

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MAURO VITOR GRECO TAVORA

APTIDÃO DE LAMELAS TERMO-MODIFICADAS DE *Pinus taeda* L.
PARA A PRODUÇÃO DE MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC)

CURITIBA

2019

MAURO VITOR GRECO TAVORA

APTIDÃO DE LAMELAS TERMO-MODIFICADAS DE *Pinus taeda* L.
PARA A PRODUÇÃO DE MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC)

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, área de concentração em Materiais e Estruturas, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador:

Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Co-orientador:

Prof. Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

T233a Tavora, Mauro Vitor Greco
Aptidão de lamelas termo-modificadas de *pinus taeda* para a
produção de madeira laminada colada (MLC) [recurso eletrônico] /
Mauro Vitor Greco Tavora – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de
Construção Civil.

Orientador: Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Coorientador: Jorge Luis Monteiro de Matos

1. *Pinus taeda* – Modificação térmica. 2. Lâminas de madeira –
Propriedades físicas. 3. Adesividade. I. Universidade Federal do
Paraná. II. Medeiros, Marcelo Henrique Farias de. III. Matos, Jorge
Luis Monteiro de. IV. Título.

CDD: 694.2

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



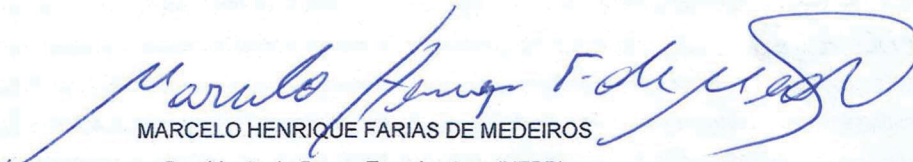
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL - 40001016049P2

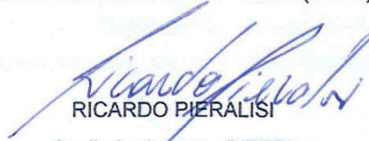
TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MAURO VITOR GRECO TAVORA** intitulada: **Aptidão de lamelas termo-modificadas de Pinus taeda para a produção de madeira laminada colada (MLC)**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

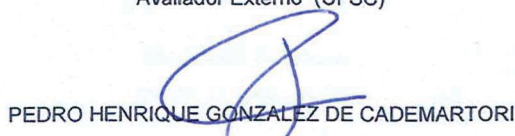
A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 10 de Abril de 2019.


MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


RICARDO PERALISI
Avaliador Interno (UFPR)


POLIANA DIAS DE MORAES
Avaliador Externo (UFSC)


PEDRO HENRIQUE GONZALEZ DE CADEMARTORI
Avaliador Externo (UFPR)

Dedico essa dissertação à minha família.

Aos meus queridos pais Ricardo e Maria Giuseppina pela educação, dedicação, paciência e amor a mim concedidos. Às minhas irmãs Mariana, Isabel e Beatriz pelo carinho e apoio. E aos meus avós Mauro e Assunta pela experiência e ensinamentos transmitidos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros, pela orientação, sugestões, amizade e por aceitar o desafio de fugir um pouco do cinza do concreto;

Ao Prof. Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos por aceitar co-orientar um aluno externo do mundo florestal, e por me transmitir tanto conhecimento em nossas reuniões e suas aulas;

Aos técnicos da UFPR Ademir Cavalli, Míria Skrock, Dionéia Calixto, Fernando Ferraz, Mariuci Torres, Gisele Gimenes, Eliane Lopes, sempre dispostos ajudar nos experimentos ou com um breve conversa repleta de apoio;

Aos colegas de mestrado e de doutorado Isaac Oliveira, Douglas Carvalho, Cláudio Juízo, Victor Cremonez, Pedro Loiola, Ramiro França, David Buratto, Cibele Reis, Lineia Zen, Vinicius Rosa, Ângela Stüpp, Eraldo Bonfatti, que me ajudaram muito com explicações, sugestões, muitas discussões e também na execução da parte prática, que, sem dúvida seria impossível sem a ajuda dos mesmos;

À minha família, por todo o apoio constante, não somente durante o Mestrado, mas também em todas as outras etapas da minha vida;

À minha companheira Suellen Fernanda Lopes, pelo apoio incessante e pela paciência nos momentos de cansaço e de ausência;

Aos professores Alexandre Behling, Pedro Cademartori, Poliana Dias de Moraes, Ricardo Pieralisi, Ricardo Klitzke, Márcio da Rocha, Romano Timofeiczky e José Guilherme Prata, por orientações não oficiais, conselhos e conversas muito úteis;

E por fim, à Universidade Federal do Paraná que vem sendo a minha segunda ou até primeira casa desde 2009 quando cheguei a Curitiba. Instituição onde me graduei e, atualmente, trabalho, onde aprendo algo todos os dias e sou feliz.

MUITO OBRIGADO A TODOS.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a aptidão da madeira de *Pinus taeda* L. termomodificada para a função de lamelas e posterior confecção de produtos de madeira laminada colada. O material foi termomodificado em três patamares de temperatura (160, 180 e 200°C), respeitando as diretrizes do documento de patente: Processo de modificação térmica por irradiação de calor, para a melhora da estabilidade dimensional e da durabilidade biológica de madeira sólida (INPI – PI0902138-8 A2). Na sequência, foram determinadas as propriedades físicas (perda de massa, teor de umidade de equilíbrio, estabilidade dimensional, densidade aparente e molhabilidade) e mecânicas (resistência à compressão, resistência à flexão e resistência ao cisalhamento) das amostras testemunha e do material termomodificado. Também foram aplicadas as técnicas não-destrutivas de ultrassom e ondas de tensão, visando estabelecer correlações com propriedades das madeiras termomodificadas determinadas pelos ensaios mecânicos destrutivos. Foi observada uma redução no teor de umidade de equilíbrio para todas as temperaturas aplicadas, alteração positiva que indica uma redução da higroscopicidade do material. Somente o tratamento a 200°C resultou em uma melhora na estabilidade dimensional do material, o qual ocasionou uma menor taxa de absorção de água e variação volumétrica. O tratamento a 200°C também se destacou na alteração da molhabilidade do material, evidenciado pelo aumento nos ângulos de contato. A densidade aparente a 0% de umidade do material não se alterou entre os diferentes tratamentos térmicos. Em relação às propriedades mecânicas foi observado um aumento na resistência à compressão paralela às fibras, apesar do módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE), na flexão estática, não se alterarem devido à modificação térmica. Apenas o tratamento a 200°C foi prejudicial à adesividade do material, enquanto que a modificação térmica a 160 e 180°C não ocasionou reduções na resistência ao cisalhamento na linha de cola, indicando a possibilidade de uso de material termomodificado em produtos de madeira que passem por processo de colagem. Além disso, os valores de módulo de elasticidade dinâmico determinados a partir das técnicas não-destrutivas de ultrassom e ondas de tensão (*Stress Wave Timer*) apresentaram fortes correlações com o módulo de elasticidade estático (MOE), determinado pelo ensaio destrutivo de resistência à flexão estática, evidenciando a possibilidade de utilizar tais técnicas para a estimativa de propriedades mecânicas de madeiras nas quais tenha sido aplicado um processo de modificação térmica.

Palavras-chaves: Modificação térmica. Propriedades físicas e mecânicas. Adesividade.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the ability of thermally modified *Pinus taeda* L. wood for the function of lamellae and later confection of glulam products. The material was heated in three temperature stages (160°C, 180°C and 200°C), respecting the guidelines of the patent document: Thermal modifying process by heat irradiation, for the improvement of dimensional stability and durability solid wood (INPI - PI0902138-8 A2). Afterwards, physical properties (mass loss, equilibrium moisture content, dimensional stability, apparent density at 0% moisture content and wettability) and mechanical properties (compression parallel to grain strength, static bending strength and shear strength in the glue line) were determined for thermally treated and untreated material. Non-destructive techniques of ultrasound and Stress Wave Timer were also applied in order to establish correlations with the modified woods mechanical properties determined by destructive mechanical tests. A reduction in equilibrium moisture content was observed for all applied temperature, a positive change indicating a reduction in the hygroscopicity of the material. Only the treatment at 200°C resulted in an improvement in the dimensional stability of the material, which a lower rate of water absorption and volumetric variation. The treatment at 200°C also altered the wettability of the material, evidenced by the increase in the contact angles. The apparent density at 0% moisture content of the material did not change due to the different heat treatments. Regarding mechanical properties, an increase in the compressive strength parallel to the fibers was observed with the heat treatment although the modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE), at static bending, did not change due to the thermal modification. Only the treatment at 200°C was detrimental to the adhesiveness of the material, whereas the thermal modification at 160 and 180°C did not cause reductions in the shear strength in the glue line, indicating the possibility of using thermo-modified material in wood products that pass through a bonding process. Besides that, dynamic modulus of elasticity values, determined from the nondestructive techniques of ultrasound and Stress Wave Timer had strong correlations with the static modulus of elasticity (MOE), determined by the destructive test of static bending, showing the possibility of using such techniques for the estimation of mechanical properties of heat-treated wood.

Keywords: Thermal modification. Physical and Mechanical properties. Adhesion.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	10
1.2 OBJETIVOS	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 MADEIRA	14
2.1.1 Madeira de florestas plantadas – Gênero <i>Pinus</i>	14
2.1.2 Composição química.....	16
2.1.3 Propriedades físicas.....	18
2.1.4 Propriedades mecânicas.....	20
2.2 MADEIRA LAMINADA COLADA – MLC.....	22
2.2.1 Histórico	22
2.2.2 Produção de elementos de MLC	23
2.2.3 Processo de colagem das lamelas.....	24
2.3 MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA.....	27
2.3.1 Processo de modificação térmica	27
2.3.2 Alteração na composição química	28
2.3.3 Alteração em propriedades físicas	30
2.3.4 Alteração em propriedades mecânicas	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 MATERIAL	33
3.2 MODIFICAÇÃO TÉRMICA	34
3.2.1 Equipamento de aquecimento.....	34
3.2.2 Rampa de aquecimento	35
3.3 CORPOS DE PROVA	37
3.4 AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS.....	39
3.4.1 Determinação da perda de massa	39

3.4.2	Determinação do teor de umidade de equilíbrio.....	40
3.4.3	Determinação da estabilidade dimensional.....	40
3.4.4	Determinação densidade aparente	41
3.4.5	Determinação da molhabilidade.....	41
3.5	AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	42
3.5.1	Ensaio destrutivos	42
3.5.1.1	Resistência à compressão paralela às fibras.....	43
3.5.1.2	Resistência à flexão estática	43
3.5.1.3	Resistência ao cisalhamento na linha de cola	44
3.5.2	Ensaio não-destrutivos.....	46
3.5.2.1	Ensaio de ondas de tensão (<i>Stress Wave Timer</i>).....	46
3.5.2.2	Ensaio de ultrassom	47
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	PROPRIEDADES FÍSICAS	49
4.1.1	Perda de massa	51
4.1.2	Teor de umidade de equilíbrio.....	53
4.1.3	Estabilidade dimensional.....	55
4.1.3.1	Taxa de absorção	55
4.1.3.2	Variação volumétrica	57
4.1.4	Densidade aparente a 0% de umidade	58
4.1.5	Molhabilidade	59
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	62
4.2.1	Resistência à compressão paralela às fibras	64
4.2.2	Resistência à flexão estática.....	66
4.2.3	Resistência ao cisalhamento na linha de cola.....	70
4.2.4	Ensaio não destrutivos	72

5	CONCLUSÕES	77
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
	REFERÊNCIAS	79

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A madeira deve ser reapresentada à sociedade brasileira atual como material de construção definitivo, após ter passado por um período de discriminação no Brasil, tanto por questões culturais ou apenas por desinformação. Ela é uma forte alternativa técnica e ecológica a outros materiais, como aço, alumínio, produtos cerâmicos e derivados do cimento.

A utilização de madeira na construção civil apresenta grande vantagem ambiental por ser um recurso renovável, que, se produzido e utilizado de forma sustentável, jamais se esgotará. Além disso, possui características técnicas que a tornam adequada para uma ampla gama de aplicações, com produtos variando desde simples toras até compósitos de madeira altamente processados, projetados e fabricados industrialmente, intitulados produtos engenheirados de madeira (FALK, 2010). Os produtos engenheirados são constituídos por uma combinação de componentes menores de madeira, unidos por meio de adesivos estruturais e projetados usando métodos de engenharia, podendo ser uma alternativa às madeiras somente serradas (ASTM D 2559-12A, 2018), e também a outros materiais como aço e concreto.

A madeira laminada colada (MLC), produto engenheirado com grande potencial, soluciona um grande entrave relacionado à madeira maciça que é a limitação dimensional vinculada às dimensões naturais das árvores, viabilizando elementos estruturais com grandes dimensões. Além disso, proporciona maior controle e uniformidade das propriedades mecânicas nos elementos estruturais, pois, durante a produção dos mesmos, aplica-se um controle de qualidade mais rigoroso, eliminando nós e outros defeitos. De acordo com Segundinho et al. (2014), elementos de MLC apresentam uma excelente relação resistência/peso, que propicia construções mais leves e economia no projeto de fundações, e ainda contribuem para a fixação de carbono presente na atmosfera, com consequente redução do aquecimento global.

A tecnologia de MLC já não pode ser considerada inovadora, tendo em vista que os primeiros elementos construídos de MLC na Europa datam do início do século 20 (CUNHA, 2007). Entretanto, a participação deste material

no mercado da construção civil nacional ainda é muito pequena, considerando o seu imenso potencial.

Embora a tecnologia de MLC solucione questões dimensionais relacionadas à madeira maciça e também aumente o controle de qualidade durante o processo de fabricação de elementos estruturais, sua matéria-prima madeira, continua sendo um material orgânico, heterogêneo e anisotrópico. O fato de ser orgânico torna o material suscetível a ataques biológicos, sendo tal problema agravado no Brasil, país com uma maior parcela de área tropical, que propicia condições mais adequadas a organismos biodeterioradores da madeira. Uma solução encontrada para esse entrave, e mais utilizada nacionalmente, foi o tratamento químico, a partir da aplicação de preservantes, como arseniato de cobre cromatado (CCA). Entretanto, por utilizar componentes tóxicos para a saúde, tal prática apresenta impasses ambientais, principalmente relacionados à disposição final correta dos resíduos de madeiras tratadas. Em contrapartida, há estudos sobre outras técnicas de modificação das propriedades da madeira, como a modificação térmica, que proporciona maior resistência do material à biodeterioração, com menor impacto para o meio ambiente (HILL, 2006).

A técnica de modificação térmica da madeira já é bastante conhecida na Europa, de forma que há estudos sobre o tema desde 1915. Ela consiste em submeter o material a elevadas temperaturas, ocasionando alterações químicas e físicas em sua estrutura. Este processo térmico aumenta a durabilidade da madeira à biodeterioração por organismos xilófagos e também reduz a higroscopicidade, aumentando a estabilidade dimensional do material e minimizando os defeitos relacionados à anisotropia (BATISTA, 2012). Entretanto, a modificação térmica também pode gerar alterações nas propriedades mecânicas da madeira, como resistência à flexão e à compressão, podendo acarretar uma redução das mesmas, dependendo das espécies tratadas e das condições de tratamento (MBURU et al., 2008), havendo também casos de melhoria nessas propriedades (SILVA, 2012; KOL et al., 2017)

A utilização de lamelas termomodificadas para a confecção de elementos de madeira laminada colada (MLC) somaria as vantagens proporcionadas pela modificação térmica a um produto engenheirado de

madeira. Porém, para o desenvolvimento desse possível compósito, alguns fatores devem ser levados em consideração. A modificação térmica causa alterações na estrutura química das madeiras, podendo alterar a superfície e prejudicar a adesividade das mesmas. Segundo Christiansen (1990), a migração de extrativos para a superfície, fenômeno frequente no processo de modificação térmica, pode causar uma inativação (*“Wood inactivation”*) e uma redução da adesividade das mesmas. Considerando que a adesividade é um parâmetro essencial para a qualidade da fabricação de elementos de MLC, tal comportamento deve ser previamente avaliado e esclarecido.

Além disso, a alteração das propriedades mecânicas é outro fator que deve ser considerado. Tendo em vista que os produtos de MLC são frequentemente aplicados como elementos estruturais, torna-se necessário compreender em que grau ocorre essas alterações nas propriedades e em casos de redução, dependendo do grau, como poderiam ser contornadas.

Para uma utilização racional da madeira, na produção de MLC, as lamelas passam por uma classificação mecânica e de acordo com a mesma, são posicionadas nos elementos de forma a serem mais ou menos solicitadas durante o serviço. Considerando que esta classificação é frequentemente realizada por métodos não destrutivos, como ultrassom e ondas de tensão, é interessante verificar se, após a modificação térmica, as correlações e estimativa das propriedades mecânicas das madeiras, por meio das técnicas não destrutivas, ainda são viáveis.

A união de tecnologias que obtiveram êxito de forma isolada, confeccionando elementos de madeira laminada colada com material termomodificado, pode gerar um produto com grande potencial no mercado. Este produto apresentaria um grande apelo ambiental, por aplicar um material orgânico 100% renovável, sem tratamentos químicos e também um apelo técnico, promovido pela técnica de MLC que permite um maior controle sobre as propriedades finais do produto.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliara aptidão da madeira de *Pinus taeda* L. termomodificada a 160, 180 e 200 °C para a função de lamelas e posterior produção de elementos de madeira laminada colada (MLC).

Neste contexto, os objetivos específicos do trabalho foram:

- Avaliar o comportamento físico do material, antes e após o processo de modificação térmica, por meio de ensaios de perda de massa, teor de umidade de equilíbrio, estabilidade dimensional, densidade aparente a 0% de umidade e molhabilidade;
- Avaliar o comportamento mecânico do material, antes e após o processo de modificação térmica, por meio de ensaios de resistência à compressão paralela às fibras e resistência à flexão estática;
- Avaliar a adesividade do material, antes e após o processo de modificação térmica, por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento na linha de cola;
- Aplicar e avaliar as metodologias não destrutivas de ultrassom e ondas de tensão como ferramentas para estimativa de propriedades mecânicas do material termomodificado;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica está dividida em três partes. A primeira parte, intitulada madeira, aborda a oferta desse material no Brasil, proveniente de florestas plantadas e aspectos sobre sua composição química e propriedades físico-mecânicas. A segunda parte, intitulada madeira laminada colada (MLC), apresenta este produto engenheirado de madeira a partir de um breve histórico sobre o material, aspectos sobre sua produção e por fim foca no processo de colagem das lamelas. A terceira parte intitulada modificação térmica da madeira apresenta este processo térmico, suas variáveis e as alterações que o mesmo ocasiona na composição química e propriedades físico-mecânicas da madeira.

2.1 MADEIRA

A madeira é um dos principais materiais de construção, desempenhando papel importante em todas as civilizações, com funções tanto estruturais como também arquitetônicas (NIELSEN, 1998). A utilização deste material na construção civil é consagrada mundialmente sendo aplicado em grande escala, de forma definitiva, em países desenvolvidos como Estados Unidos, Canadá, Austrália e Japão, nos quais apresenta resultados mais do que satisfatórios. No Brasil, a maior parcela de madeira empregada nas construções exerce funções somente provisórias (CUNHA, 2007), como cimbramento (formas e escoramentos) para posterior concretagem de elementos estruturais.

O Brasil possui aproximadamente 493,5 milhões de hectares (58% do seu território) cobertos por florestas nativas e plantadas. As plantadas, geralmente de pinus e de eucaliptos, contribuem com apenas 1,5% do total de florestas existentes, embora desempenhem papel importante no mercado de produtos florestais com cerca de 90% da produção total de madeira industrial (SINF, 2016).

2.1.1 Madeira de florestas plantadas – Gênero *Pinus*

As florestas plantadas são destinadas, segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (2009), a produzir matéria-prima para as indústrias de papel e de celulose, a siderurgia (carvão

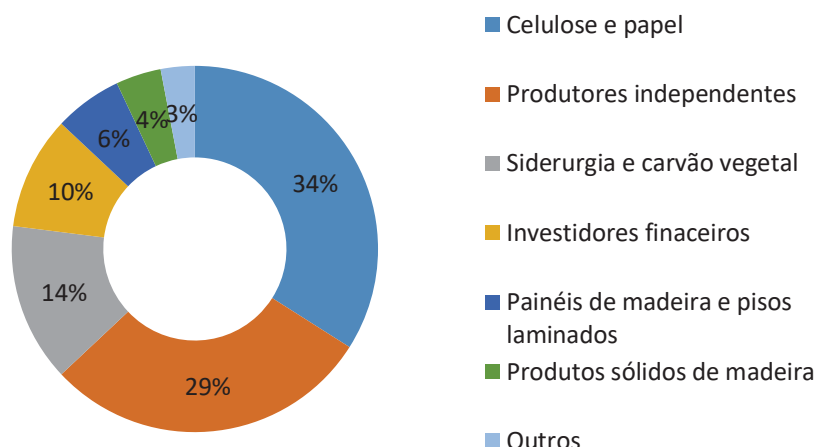
vegetal), madeira serrada, painéis à base de madeira e móveis. Com cerca de 7,84 milhões de hectares de reflorestamento, o setor de árvores plantadas representa 6,2% do PIB industrial nacional (IBÁ, 2017), e desempenha papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico do país, contribuindo para a produção de bens e de serviços, agregando valor aos produtos florestais e gerando empregos, impostos e renda (CALIL NETO, 2011).

As condições de solo e de clima, presentes no do Brasil, possibilitam produzir o maior volume de madeira por unidade de área e também a menor rotação do mundo, que consiste no tempo decorrido entre o plantio e a colheita das árvores. Esse fato faz com que a produtividade da indústria brasileira de base florestal seja mundialmente reconhecida, posicionando o Brasil em primeiro lugar, em 2016, no ranking global de produtividade florestal, com uma média de 30,5 m³/ha ao ano para os plantios de pinus e 35,7m³/ha ao ano para os plantios de eucalipto.

A introdução de espécies de pinus no Brasil ocorreu durante os anos 60, quando houve uma expansão das atividades de florestamento estimulada por programas de incentivos fiscais do governo. Neste período, foram aplicadas as espécies exóticas *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, principalmente, nas regiões Sul e Sudeste do país, devido à fácil adaptação das mesmas ao clima temperado (PRATA, 2010). Atualmente, as florestas plantadas de pinus ocupam cerca 1,6 milhões de hectares e continuam concentradas na região Sul do Brasil, com 42% no Paraná e 34% em Santa Catarina (IBÁ, 2017).

Segundo o relatório anual da Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2017), os proprietários das áreas de florestas plantadas no Brasil estão segmentados conforme a Figura 1, que fornece uma orientação em relação aos propósitos das florestas. Neste contexto, o mercado da construção civil, que consome, em sua maioria, madeira serrada, representada por produtos sólidos de madeira (Figura 1), apresenta um percentual bastante baixo, apenas 4% em relação ao total da produção madeireira. Tal valor já reflete a queda no consumo nacional de madeira serrada, que passou de 7,2 milhões de m³ em 2015 para 6,4 milhões de m³ em 2016 devido à contínua desaceleração da construção civil. Até mesmo se for considerada a produção de pisos e também que parte da produção de painéis de madeira vai para a construção civil, o percentual continuaria abaixo do potencial nacional.

FIGURA 1 - COMPOSIÇÃO DA ÁREA DE ÁRVORES PLANTADAS POR TIPO DE USO FINAL.



FONTE: Adaptado de IBÁ (2017).

A madeira proveniente de florestas plantadas, por apresentar uma maior homogeneidade de suas propriedades tecnológicas, permite um maior controle sobre mesmas, o que a torna, neste ponto de vista, um material bastante interessante para ser aplicado na construção civil. Entretanto, considerando que grande parte dos produtores independentes destina sua produção para a indústria de papel e de celulose, a mesma consome a maior parcela da produção madeireira, induzindo um manejo silvicultural das florestas plantadas direcionado principalmente para este setor. Este fato faz com que essas madeiras sejam pouco adequadas para fins estruturais, refletindo em uma baixa utilização desse material em construções (CUNHA, 2007).

Laroca (2002), por outro lado, atribui à baixa produção de madeiras de qualidade, justamente o fato da pequena utilização de madeiras oriundas de florestas plantadas em construções, que é ainda intensificada por preços elevados e pela falta informação das possibilidades do seu uso.

Independente da origem da madeira seja ela proveniente de florestas nativas ou plantadas, para uma utilização correta e aproveitar as vantagens que o material proporciona, é fundamental conhecer sua composição química e propriedades físico-mecânicas.

2.1.2 Composição química

Os constituintes da madeira podem ser separados substâncias externas (extrativos) e em componentes da parede celular, sendo a última

estruturalmente composta pelos polímeros de celulose, hemicelulose e lignina, que definem, em grande parte, as propriedades físicas do material (BODIG e JAYNE, 1982). Variações nas características e proporções desses componentes e diferenças na estrutura celular tornam as madeiras pesadas ou leves, rígidas ou flexíveis e duras ou moles (WIEMANN, 2010).

A celulose é o carboidrato mais abundante na natureza e o principal componente da parede celular, constituindo 40-50% da massa seca das madeiras (SKAAR, 1972; SUNDQVIST, 2004). Sua estrutura favorece uma organização das cadeias de celulose em feixes com ordenação cristalina, unidos por ligações de hidrogênio. Entretanto, sua estrutura não consiste apenas em regiões cristalinas, altamente ordenadas, havendo também regiões desordenadas ou amorfas. A presença de três grupos hidroxila permite trocas espontâneas de água com o ambiente nas regiões amorfas, onde os mesmos não estão envolvidos em ligações entre cadeias (GOLDSTEIN, 1991).

Na madeira, a celulose é responsável por grande parcela da resistência do material e suas moléculas são fortemente associadas às polioses (hemiceluloses) e lignina, sendo necessário para sua separação um tratamento químico intensivo (FENGEL e WEGENER, 1989; WILCOX et al., 1991).

As hemiceluloses, assim como a celulose, são polissacarídeos (não celulósicos), também organizados em cadeias, porém mais curtas formando uma estrutura geralmente menos ordenada e amorfa. Este polímero constitui 20-30% da massa seca das madeiras e pode ser considerada a interface entre a celulose e a lignina na estrutura das madeiras. (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968; SUNDQVIST, 2004; Hill, 2006).

As moléculas de hemiceluloses também possuem hidroxilas, entretanto por não serem perfeitamente orientadas e espaçadas, têm maior dificuldade para formar pontes de hidrogênio fortes entre moléculas. Esse fato faz com que as mesmas permaneçam livres, facilitando a ligação com moléculas de água (KEEY et al., 1999).

A lignina é um polímero com estrutura amorfa e representa 20-40% da massa seca das madeiras. Este polímero pode ser considerado o agente cimentante que mantém as células unidas e também serve como uma barreira contra a degradação enzimática da parede celular (FENGEL e WEGENER, 1989; GOLDSTEIN, 1991). Os grupos hidroxila presentes na celulose e

hemicelulose tornam a parede celular e, por consequência a madeira, higroscópica. Entretanto a lignina é em parte hidrofóbica. Isso significa que, embora a parede celular da madeira apresente uma grande afinidade com a água, sua capacidade de absorver água é limitada em parte pela presença de lignina (WIEDENHOEFT, 2010).

Os extrativos são compostos de baixa massa molecular e representam 2-8% da massa seca das madeiras. Estes compostos também estão presentes na parede celular, porém são encontrados com maior frequência e em maior quantidade na cavidade das células (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968; FENGEL e WEGENER, 1989; SUNDQVIST, 2004).

Os extrativos desempenham papel importante relacionado a características como coloração, odor, gosto e durabilidade das madeiras. Em algumas espécies, compostos fenólicos, agem como repelente de insetos ou até mesmo inseticida, impedindo o ataque e degradação do material por esses organismos. Em relação ao comportamento mecânico, os extrativos exercem pouca influência direta, contudo, considerando que podem modificar a densidade e teor de umidade do material, os mesmos também modificam, indiretamente, muitas propriedades mecânicas das madeiras (BODIG e JAYNE, 1982).

2.1.3 Propriedades físicas

A densidade e o teor de umidade estão entre as características mais importantes das madeiras. A densidade refere-se à massa do material por uma unidade de volume e apresenta forte relação com o comportamento mecânico das madeiras. Em geral, quando a densidade aumenta, as propriedades mecânicas, como resistência e rigidez, também aumentam. A densidade é bastante influenciada pela umidade do material, de forma que comparações entre densidades só podem ser realizadas entre madeiras com o mesmo teor de umidade (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968; BODIG e JAYNE, 1982).

A higroscopicidade da madeira a torna capaz de reter água do ambiente onde estão inseridas, devido às forças atrativas das hidroxilas (grupos OH) livres, mantendo uma umidade de equilíbrio com o vapor d'água presente no ar (SKAAR, 1972; KOLLMANN et al., 1975). A água está presente na parede celular das madeiras como água de constituição e também nas

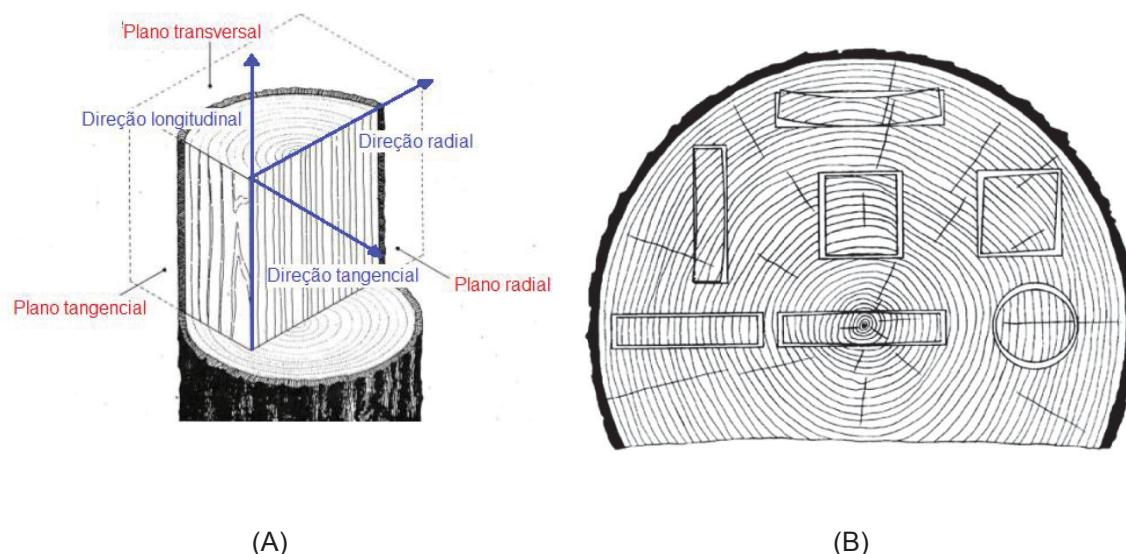
cavidades das células, na forma de vapor ou líquida (água livre). O teor de umidade é expresso no percentual referente à quantidade de água presente no material em relação à massa seca do mesmo (SKAAR, 1972; BODIG; JAYNE, 1982).

A quantidade de água presente na madeira também altera significativamente as propriedades físicas e mecânicas das madeiras, tornando relevante o conhecimento do teor de umidade do material. Alguns autores citam que a resistência e rigidez da madeira tendem a um valor máximo à medida que o teor de umidade do material vai reduzindo e se aproximando de 0% de umidade (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968; BODIG e JAYNE, 1982).

Quando o teor de umidade se encontra abaixo do ponto de saturação das fibras — PSF (em torno de 28% de umidade), a variação da umidade pode resultar em uma variação dimensional do material e “defeitos” na madeira. Em diversas situações, um dos maiores problemas práticos para o uso da madeira é relacionado aos inchamentos e a contrações, resultantes da variação de umidade do material (SKAAR, 1972). A variação volumétrica da madeira é determinada em função dos valores de contração ou inchamento observados nas direções tangencial, radial e longitudinal (Figura 2 – A). A variação dimensional na direção tangencial é aproximadamente equivalente ao dobro da observada na direção radial, a passo que na direção longitudinal é irrisória quando comparada às outras duas direções, podendo ser desconsiderada na maior parte dos casos (BODIG; JAYNE, 1982).

Dependendo da orientação dos anéis de crescimento e do grau de contração nas direções tangencial e radial, a secagem da madeira pode gerar diferentes distorções e defeitos no material conforme a Figura 2 - B. As variações dimensionais constituem características indesejáveis da madeira, limitando o seu uso para diversas finalidades (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968; BODIG e JAYNE, 1982).

FIGURA 2- (A) PLANOS E DIREÇÕES ANATÔMICAS DA MADEIRA; (B) CARACTERÍSTICAS DA CONTRAÇÃO E DISTORÇÃO DA MADEIRA CONFORME A ORIENTAÇÃO DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO



FONTE: Adaptado de GLASS e ZELINKA (2010)

O inchamento e contração das madeiras podem ser atenuados significativamente através da redução da higroscopicidade do material. Esta redução pode ser alcançada por meio de um aquecimento da madeira a elevadas temperaturas, que causa uma perda da água de constituição acompanhada de perda de massa, devido à degradação térmica de componentes como, por exemplo, as hemiceluloses, que por sua vez pode resultar em uma estabilização dimensional do material (STAMM, 1964).

2.1.4 Propriedades mecânicas

A madeira é um material natural e orgânico que apresenta uma grande variabilidade de propriedades mecânicas entre espécies diferentes. Tal variabilidade também é observada entre árvores de uma mesma espécie e até mesmo entre amostras de madeira provenientes de uma mesma árvore (BURGER e RICHTER, 1991). Este comportamento tem origem em influências externas, como temperatura e umidade, condições do solo e espaço para o desenvolvimento, entre outras, as quais as árvores estão sujeitas durante seu crescimento (KRETSCHMANN, 2010).

Por ser um material anisotrópico, a madeira também apresenta propriedades mecânicas distintas para cada direção referente aos três eixos principais: longitudinal, radial e tangencial (Figura 2 – A) (WILCOX et al.,

1991). Considerando essa variação, a avaliação mecânica das madeiras distingue duas direções principais da madeira: paralela às fibras e perpendicular às fibras.

O módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) obtidos em ensaio de flexão e a tensão máxima na compressão paralela às fibras são propriedades mecânicas frequentemente avaliadas para o dimensionamento de estruturas de madeira, e são determinadas por meio de ensaios de resistência à flexão estática e resistência à compressão paralela às fibras (KRETSCHMANN, 2010).

Módulo de ruptura reflete a capacidade máxima de carga que a madeira é capaz de suportar quando submetido à flexão, antes do colapso, já o módulo de elasticidade indica a rigidez da madeira. Quanto maior a rigidez menor será a deflexão de um elemento quando submetido à flexão. A resistência à compressão paralela às fibras, por sua vez, é a tensão máxima suportada pela madeira quanto comprimida por uma força cuja direção é paralela às fibras (WILCOX et al., 1991). O conhecimento destas propriedades é fundamental para predizer o comportamento de elementos estruturais, como por exemplo, vigas e pilares.

Na confecção de estruturas, embora seja um excelente material, a madeira maciça possui características que podem restringir a sua utilização em algumas situações, relacionadas com os seguintes fatores (IWAKIRI et al., 2005):

- Dimensões: A largura e o comprimento máximo de um elemento de madeira maciça são limitados pelas dimensões (diâmetro e comprimento) das árvores;
- Anisotropia: A estrutura heterogênea e de natureza anisotrópica da madeira faz com que as suas propriedades sejam distintas nas direções tangencial, radial e longitudinal, podendo resultar em variações dimensionais diferenciais, e, por consequência, defeitos;
- Defeitos naturais: Particularidades de cada madeira como os nós, a inclinação da grã (fibras), entre outros, interferem no comportamento reológico do material.

Diante de limitações intrínsecas da madeira maciça, por vezes pouco desejadas, se torna necessário o desenvolvimento e aplicação de técnicas para superar tais características e possibilitar um maior emprego da madeira para diversos fins, pois se trata de um material com grande apelo ambiental por ser proveniente de fontes renováveis (MAGALHÃES e SANTOS, 2009).

A técnica de madeira laminada colada (MLC) soluciona ou contorna alguns dos entraves, levantados por Iwakiri et al. (2005), relacionados à madeira. Esta técnica utiliza a madeira de forma mais racional, o que proporciona maior qualidade, conhecimento e uniformidade de propriedades e, por consequência, maior eficiência no emprego final desse recurso. (STARK et al., 2010).

2.2 MADEIRA LAMINADA COLADA – MLC

A técnica de madeira laminada colada (MLC) consiste em um uso racional e otimizado da madeira, que permite o emprego de peças com seções e comprimentos variados na formação das lamelas, que posteriormente serão unidas para formar a MLC. Os elementos de MLC podem ser retos ou curvos e suas dimensões são limitadas somente pela capacidade dos processos de manufatura e pelos sistemas de transporte, o que proporciona infinitas possibilidades de projeto (CALIL NETO et al., 2016; MIOTTO e DIAS, 2009; NIELSEN, 1998).

2.2.1 Histórico

O início da fabricação de elementos de MLC se deu em 1906, quando Otto Hetzer, um carpinteiro suíço, desenvolveu vigas estruturais sobrepondo tábuas de madeira, para obter seções transversais com dimensões maiores, unindo-as com cola (adesivo). A fabricação desse material só foi possível a partir do advento de adesivos de alta resistência, como a cola de caseína utilizada pelo carpinteiro na ocasião, as quais substituem parafusos ou ligações metálicas (CUNHA, 2007; CUNHA e MATOS, 2010b). Contudo, foi em 1940 que a técnica MLC apresentou grande progresso, graças ao advento de adesivos sintéticos (CALIL NETO, 2011).

O início da fabricação de peças de MLC no Brasil ocorreu com a fundação da empresa ESMARA Estruturas de madeira LTDA, em 1934, utilizando de tecnologia alemã. Apesar disso, no ano de 2010, existiam apenas

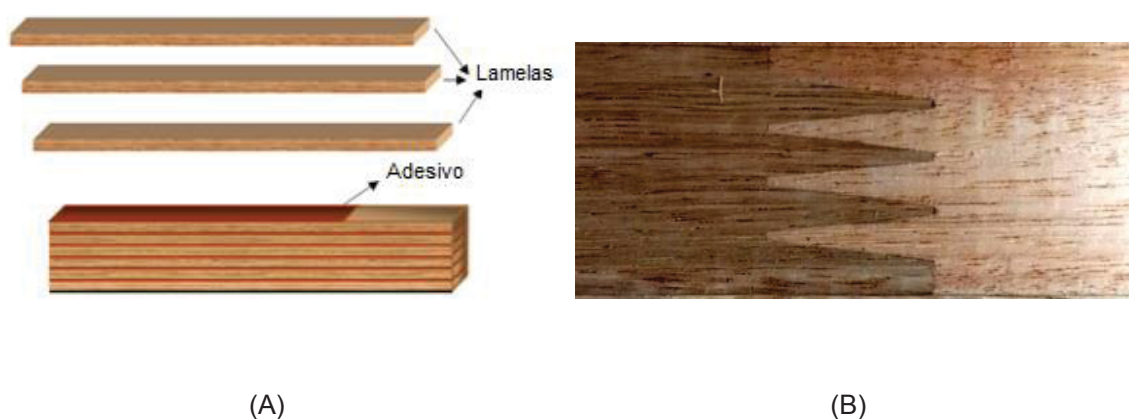
duas indústrias que produziam este produto no país. O custo da MLC em tais empresas era bastante elevado, equivalendo ao dobro do custo em países como Canadá, EUA e Chile, fato que inviabilizava sua competitividade na época (CUNHA, 2007; CALIL NETO, 2011).

Atualmente, existem sete fábricas produtoras de MLC no país distribuídas entres os estados da região sul, sudeste e centro-oeste (LEITE et al., 2017). E o número de construtoras com *know-how* de aplicação deste material vem aumentando gradativamente, porém ainda há bastante espaço para o crescimento deste mercado.

2.2.2 Produção de elementos de MLC

Os elementos de MLC são formados a partir da união de tábuas por meio de um adesivo sobrepostas com as fibras paralelas ao eixo longitudinal da peça final (Figura 3 - A) (BODIG e JAYNE, 1982). As lamelas, por sua vez, podem ser formadas pela união de pedaços de madeira com comprimentos inferiores ao da peça final de MLC que se almeja e com espessuras variando entre 10 e 50 mm. O processo de formação das lamelas é conhecido como laminação e a união entre os pedaços pode ser realizada por emendas biseladas ou “*finger joints*” em conjunto com adesivo (Figura 3 - B) (CALIL et al., 2016; AZAMBUJA et al., 2004).

FIGURA 3 - (A) DESENHO ESQUEMÁTICO DA PRODUÇÃO DE MLC (B) UNIÃO "FINGER JOINT".



FONTE: Adaptado de ZANGIÁCOMO(2003).

FONTE: O autor (2018).

A produção de MLC pode ser dividida em quatro etapas principais: secagem e classificação da madeira; união de topos formando lamelas

(laminação), colagem das lamelas e, por fim, acabamentos superficiais e cortes nas dimensões desejadas (STARK et al., 2010).

Durante a secagem e a classificação, as lâminas de madeira passam por um processo de secagem, geralmente em estufa. Para uma colagem adequada, a madeira deve estar devidamente seca, com no máximo 18 % de teor de umidade, não devendo haver uma variação superior a 5 % entre lamelas adjacentes. Para isso, durante o processo de secagem deve haver uma homogeneização da umidade do material (MIOTTO e DIAS, 2009).

Após a secagem, as lâminas são submetidas a um processo de classificação que pode ser mecânico ou visual ou ambos (MIOTTO e DIAS, 2009). Uma possibilidade é a classificação mecânica prévia não-destrutiva, através da qual o módulo de elasticidade dinâmico do material é determinado e, por meio deste, é possível estimar o módulo de elasticidade na flexão que deverá ser considerado no processo de composição dos elementos de MLC (CALIL NETO et al., 2016). Esta etapa resulta em um uso racional da madeira, pois conhecendo o comportamento mecânico das lamelas é possível posicioná-las em porções do elemento estrutural onde serão mais ou menos solicitadas mecanicamente.

Embora todas as etapas sejam relevantes para a qualidade do produto final, a importância do processo de colagem se sobressai em relação às demais, o qual é indispensável para um bom desempenho dos elementos de MLC.

2.2.3 Processo de colagem das lamelas

A colagem das lamelas constitui na escolha de um adesivo adequado, aplicação do mesmo sobre a superfície das lamelas de madeira, sobreposição das lamelas e, na sequência, aplicação de um nível de pressão por um determinado período de tempo, que depende das recomendações do fabricante do adesivo. Após a prensagem, é necessário também aguardar o tempo de cura do adesivo, antes de submeter o elemento de MLC a esforços mecânicos.

A escolha do adesivo a ser aplicado na confecção das peças de MLC deve considerar a utilização final do produto e o ambiente onde os mesmos serão inseridos, como condições de temperatura, de umidade e alternância de sol e de chuva. (BODIG e JAYNE, 1982; CUNHA, 2007). O adesivo deve

proporcionar uniões resistentes, estáveis e duráveis, características que dependem também da compatibilidade entre o mesmo e a madeira utilizada (CUNHA, 2007). Para um bom desempenho dos adesivos, é necessário seguir as orientações dos respectivos fabricantes em relação à gramatura de aplicação, nível de pressão e tempo de cura (CALIL NETO et al., 2016).

Adesivos a base de resorcinol com cura à temperatura ambiente, frequentemente empregados na produção de MLC, apresentam alta resistência à umidade permitindo uma utilização externa dos elementos de MLC (PIZZI, 1983; CALIL NETO, 2011). Entretanto, Jiang et al. (2014) citam que os adesivos a base de fenol-resorcinol-formaldeído (PRF), atualmente, possuem uma pequena participação no mercado devido, principalmente, a sua coloração escura, porém, como já são usados há bastante tempo, servem como referência em novos estudos. Além disso, os mesmos autores comentam que os principais adesivos atualmente utilizados são à base de melamina-uréia-formaldeído (MUF), emulsão polimérica de isocianatos (EPI) e poliuretano (PUR), os quais são constantemente otimizados em relação à velocidade de cura e versatilidade de aplicação.

A emulsão polimérica de isocianatos (EPI) é um adesivo bi-componente formado por um polímero que é ativado por meio de um endurecedor (catalisador). Como é bastante reativo, o tempo de aplicação deve seguir rigorosamente as recomendações dos fabricantes (LOPES, 2008). Possui coloração branca e seu processo de cura pode ocorrer em elevada temperatura ou ambiente, entretanto, é necessário a aplicação de elevada pressão durante a colagem. O adesivo EPI é enquadrado como estrutural, de uso exterior sem restrições, resistindo a ciclos de secagem e de umedecimento de longo prazo (FRIHART e HUNT, 2010).

Praticamente todas as espécies de madeira são aptas à produção de MLC, contanto que aceitem adequadamente o processo de colagem, embora deva ser evitada a composição com espécies diferentes, ou que apresentem diferentes coeficientes de retração. Dentro da gama de possibilidades de madeiras passíveis de utilização, é aconselhado o emprego de espécies com densidade aparente entre 0,40 e 0,75 g/cm³, a 12% de umidade (CALIL NETO, 2011; AZAMBUJA et al., 2004).

O desempenho e comportamento da colagem depende de variáveis relacionadas ao substrato como presença de resíduos e qualidade da superfície de colagem, pH, presença de extrativos, e também relacionadas ao ambiente como temperatura e umidade relativa. A adesividade de madeiras e também o processo de colagem é realizada por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento na linha de cola de juntas coladas onde é determinada a tensão necessária para causar uma falha na superfície colada (DINWOODIE, 1983).

A ASTM D – 2559-12a (2018), para usos estruturais, exige que a resistência ao cisalhamento na linha de cola das juntas coladas não seja inferior a 90% da resistência ao cisalhamento da madeira sólida. A mesma norma disponibiliza valores mínimos de resistência ao cisalhamento na linha de cola para espécies de madeira mais comuns, com diferentes teores de umidade. Para a categoria *southern pine*, na qual o *Pinus taeda* L. se enquadra, os valores mínimos são 10,4 MPa e 8,6 MPa, para teores de umidade equivalentes a 8% e 12%, respectivamente.

Entretanto, a resistência ao cisalhamento na linha de cola não deve ser analisada isoladamente, sendo necessária uma avaliação da região em que ocorre a ruptura (PINCELLI et al., 2002). Para Frihart e Hunt (2010), por meio do ensaio de cisalhamento na linha de cola, a colagem se mostra adequada quando ocorrem rompimentos da madeira juntamente com o adesivo. As falhas na ruptura podem ocorrer no adesivo, na madeira ou na interface entre os dois e segundo a ASTM D – 2559-12a (2018) o percentual de falhas na madeira não deve ser inferior a 75%.

A madeira empregada no processo de fabricação de MLC pode passar por um tratamento para garantir maior durabilidade e proteção biológica, contanto que não prejudiquem a aderência dos adesivos (CALIL NETO et al., 2016). O Arseniato de cobre cromatado (CCA), preservante químico de madeiras, é o mais aplicado no Brasil, onde não existem restrições para o seu uso (VIDAL et al., 2015). Por utilizar componentes tóxicos à saúde, tal prática apresenta impasses socioambientais, relacionados principalmente com a correta disposição final dos resíduos das madeiras tratadas e também com a possível liberação do cromo e do arsênio na biosfera. Por essa razão, seu uso

vem sendo limitado em diversos países ou até banido em casos mais severos (HILL, 2006).

O processo de modificação térmica pode ser visto como uma alternativa a tratamentos de preservação química, pois por aplicar somente calor em grande parte dos processos, ao invés de produtos químicos, gera um menor impacto negativo ao meio ambiente.

2.3 MODIFICAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA

A modificação térmica é um processo de alteração de propriedades da madeira, capaz de proporcionar uma redução da higroscopicidade, aumento da estabilidade dimensional e contribui para uma melhora da resistência do material à biodeterioração. Um dos primeiros trabalhos relacionados a modificação térmica da madeira data de 1915, no qual Tiemann (1915) relata o efeito de altas temperaturas sobre as propriedades físicas da madeira. Aquecendo o material por meio de vapor superaquecido a 150°C por 4 horas, foi observada uma redução da absorção de umidade de 10 a 25% (HILL, 2006). Atualmente existem processos de modificação térmica comerciais patenteados, principalmente na Europa, como: ThermoWood® Process (Finlândia), Retification® e Le Bois Perdure® (França), Plato-Process® (Holanda) e Oil-Heat-Treatment® (Alemanha) (CALONEGO, 2009; CADEMARTORI, 2012).

No Brasil, Severo e Calonego (2011) desenvolveram um processo de modificação térmica que gerou uma patente, denominado: “Processo de modificação térmica por irradiação de calor, para a melhora da estabilidade dimensional e da durabilidade biológica de madeira sólida”. A princípio avaliaram efeito do processo para a madeira de *Eucalyptus grandis*, entretanto o mesmo pode ser utilizado para outras espécies.

2.3.1 Processo de modificação térmica

O processo de modificação térmica, também conhecido como termorretificação, expõe a madeira a elevadas temperaturas com o objetivo de alterar propriedades básicas, como umidade de equilíbrio e estabilidade dimensional, visando uma melhor utilização comercial e industrial (CADEMARTORI, 2012; SILVA, 2012).

A modificação térmica das madeiras ocorre em temperaturas entre 160 e 260°C. Abaixo de 140°C as mudanças na estrutura são insignificantes. Já

temperaturas superiores a 260°C resultam em uma degradação excessiva (HILL, 2006). Carrasco et al. (2016) citam que em temperaturas abaixo de 100°C, as mudanças nas propriedades das madeiras, decorrentes do aquecimento, são reversíveis, ao passo que acima dos 100°C, as mudanças se tornam, em parte, irreversíveis devido à degradação de componentes químicos da madeira, resultando também em perda de massa.

As alterações decorrentes do processo de modificação térmica não é um resultado relacionado somente ao nível de temperatura aplicado, sendo as modificações nas madeiras também influenciadas por outros fatores, principalmente o tempo de exposição ao calor (FENGEL e WEGENER, 1989). O tempo de exposição ao calor varia bastante, pois depende de características iniciais da madeira a ser tratada e também da utilização que mesma será posteriormente submetida.

Outros fatores que também influenciam no processo de modificação térmica são: gradiente de aquecimento, pressão, atmosfera circundante do tratamento, equipamento de tratamento, espécies e dimensões das peças de madeira utilizadas (HILL, 2006; KORKUT, 2008; MBURU et al., 2008; CARRASCO et al., 2016). A variação desses fatores gera diferentes processos térmicos e, por consequência, produtos com propriedades distintas.

A modificação térmica resulta alterações e degradação da estrutura química, que, por sua vez, geram alterações em propriedades físicas, mecânicas e biológicas das madeiras.

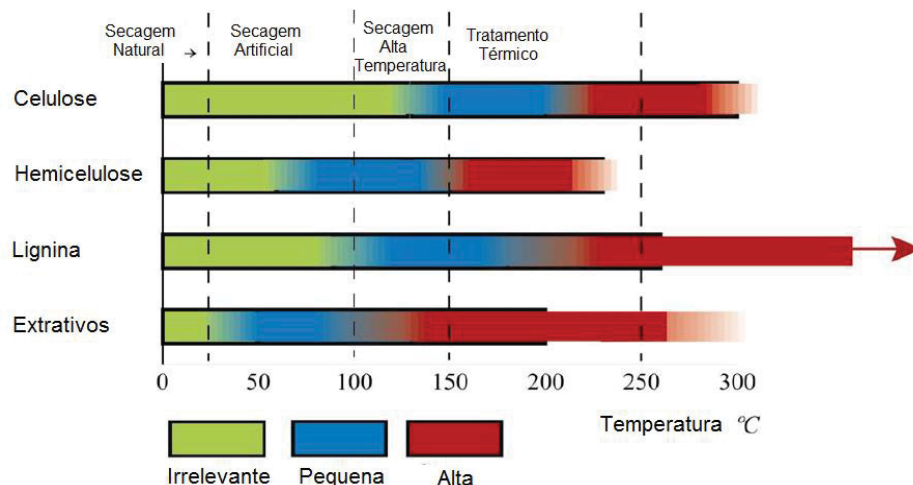
2.3.2 Alteração na composição química

A composição química da madeira é continuamente alterada ao longo do processo de modificação térmica, em diferentes instantes e níveis de temperatura. Próximo à temperatura de 100°C, ocorre perdas de água de ligação e também de extrativos voláteis. Os extrativos menos voláteis tendem a migrar para a superfície da madeira. Com o aumento da temperatura alterações químicas relacionadas às macromoléculas de celulose, hemicelulose e lignina começam a ocorrer (HILL, 2006).

A maior parte das alterações químicas na madeira ocorre entre 150 e 250°C (Figura 4). Dentre os polímeros formadores da parede celular da madeira, as hemiceluloses são os primeiros carboidratos a degradarem-se,

apresentando maiores alterações a partir de 160°C. A degradação mais acentuada da celulose e lignina ocorre a partir de 180°C. Entretanto, a taxa de degradação desses componentes é muito relativa e depende das condições impostas no tratamento térmico (FENGEL e WEGENER, 1984; SUNDQVIST, 2004; HILL, 2006).

FIGURA 4—DEGRADAÇÃO DE COMPONENTES QUÍMICOS DAS MADEIRAS DEVIDO A ELEVADAS TEMPERATURAS.



FONTE: Adaptado Sundqvist (2004)

As alterações químicas podem influenciar positivamente a resistência biológica das madeiras. A menor da deterioração das madeiras é relacionada à degradação de polissacarídeos e também redução do teor de umidade da parede celular (HILL, 2006).

Modes et al. (2017) observaram que a madeira de *Pinus taeda* submetida a um tratamento térmico (160°C), apresentou maior resistência biológica ao fungo *Trametes versicolor*, ao constatarem uma redução de 17,19% na perda de massa durante o ensaio de apodrecimento acelerado. Jermer et al. (2003) observaram um menor percentual de perda de massa de amostras de *Pinus sylvestris* e *Picea abies*, termomodificadas a 220°C, por cinco horas, em relação a amostras sem tratamento e com tratamento químico (CCA), quando sujeitas à ataque biológico. Calonego (2009) também observou decréscimos do percentual de perda de massa, entre 3,3 e 82,4% (ensaio “soil-block”) e entre 5,1 e 77,4% (ensaio “Agar-block”), a partir de tratamentos térmicos, com temperaturas variando entre 140 e 220°C, por duas horas e 30 minutos, aplicados em madeiras de eucalipto.

2.3.3 Alteração em propriedades físicas

A alteração nas propriedades físicas é resultante da degradação de componentes químicos da madeira, evidenciada pela perda de massa do material após o processo térmico (CADEMARTORI, 2012). Segundo Kollmann et al. (1975), a perda de massa pode ser diretamente relacionada às alterações em propriedades físicas da madeira, como redução de inchamentos, promovendo uma maior estabilidade dimensional.

Trabalhando com tábuas de *Eucalyptus grandis*, Calonego (2009) observou valores de perda de massa variando até 5,7%, para temperaturas de tratamento entre 140°C a 220°C. Kol et al. (2017), trabalhando com o processo finlandês ThermoWood® e aplicando temperaturas de 170 e 212°C, observaram valores de perda de massa de 1,2% e 7,3% respectivamente. Os dois grupos de pesquisadores observaram um aumento da perda de massa em função do aumento da temperatura.

Além da degradação de componentes, a perda de massa também está relacionada à eliminação da umidade presente na madeira, sendo esta última um parâmetro relevante que se relaciona com o comportamento do material em termos de trabalhabilidade, de estabilidade dimensional, de resistência mecânica e de durabilidade natural (SILVA e OLIVEIRA, 2003).

Considerando que modificação térmica degrada grande parte das hemiceluloses, componentes mais hidrófilos e, por consequência, que mais contribuem para as trocas de água com o ambiente, o processo térmico reduz a afinidade da madeira com a água alterando também o teor de umidade de equilíbrio (BORGES e QUIRINO, 2004; BELLON, 2013). Batista (2012) observou uma redução significativa da higroscopicidade a uma temperatura de 180°C, que acarretou em um decréscimo de 41,11% no teor de umidade de equilíbrio.

A alteração na higroscopicidade da madeira interfere diretamente nas variações dimensionais do material, como inchamentos e contrações. Batista (2012) observou decréscimos de até 34,55% do inchamento volumétrico de madeiras tratadas termicamente. Segundo o mesmo autor, o comportamento observado para os inchamentos acompanhou a redução do teor de umidade de equilíbrio, evidenciando a relação entre a redução da higroscopicidade com

uma maior estabilidade dimensional. Calonego (2009) encontrou até 58,4% de redução nos valores de inchamento volumétrico.

2.3.4 Alteração em propriedades mecânicas

A modificação térmica pode causar alterações nas propriedades mecânicas da madeira que contrapõe os benefícios em relação à higroscopicidade, à estabilidade dimensional e à resistência biológica. A literatura é unânime ao relacionar o processo térmico a uma redução de propriedades mecânicas (BATISTA, 2012). O aumento da temperatura acarreta em uma reorganização estrutural da madeira, que pode causar alterações permanentes em propriedades mecânicas do material. Com poucas exceções, as propriedades elásticas e de resistência reduzem com o aumento da temperatura (BODIG e JAYNE, 1982).

Jermer et al.(2003) observaram que, após o tratamento térmico, as madeiras apresentam comportamento mais frágil e quebradiço. Trabalhando com amostras de grandes dimensões, iguais a 4,5 cm x 14,5 cm x 450 cm, termomodificadas com temperatura máxima de 220°C, por um período de cinco horas, observaram um decréscimo de até 50% na resistência à flexão das madeiras, com altos coeficientes de variação, chegando a valores de 45%. Já o módulo de elasticidade do material foi menos afetado pelo tratamento, apresentando um decréscimo de 3,5%.

Calonego (2009) observou decréscimos de 24,0% a 52,3% na resistência à flexão de madeiras de *Eucalyptus grandis*, em tratamentos térmicos, aplicando temperaturas entre 180e 220°C, por um período de duas horas e 30 minutos. Entretanto, não foram verificadas alterações nos valores de rigidez do material.

Em contrapartida, Kol et al. (2017) observaram um aumento percentual de resistência à compressão paralela às fibras de madeiras termomodificadas de 4,2% a 11,53% (170 a 212°C por duas horas). Para o mesmo tratamento encontraram também um aumento do módulo de elasticidade, de 3,95% para 170°C, que reduziu para temperaturas superiores, permanecendo, no entanto, acima da amostra controle. Por outro lado, para a resistência à flexão ocorreram decréscimos de até 13,5%, para a temperatura mais alta (212°C).

Silva (2012) não observou diferenças significativas na resistência ao cisalhamento de madeiras de *Pinus taeda* termomodificadas de 160 a 200°C, por duas horas, quando comparadas entre blocos homogêneos.

A modificação térmica também pode alterar a superfície da madeira, prejudicando a adesividade do material (CARVALHO et al., 2015). Modificações na composição química da madeira (principalmente uma redução no teor de OH) alteram a molhabilidade do material, reduzindo a eficiência de adesivos polares, ou adesivos dispersos ou dissolvidos em água. Tal comportamento pode resultar em juntas fracas e falhas prematuras de um material colado, mesmo que a própria linha de cola permaneça sólida (HILL, 2006). A movimentação de extrativos para a superfície da madeira e diminuição dos grupos OH disponíveis reduz a adsorção química entre a madeira e o adesivo (SANTOS et al., 2009; VITAL et al., 2014).

Além da migração dos extrativos, Christiansen (1990) afirma que o fechamento dos microporos da madeira também está relacionado com a inativação da sua superfície. Entretanto, segundo Santos et al. (2009), uma lixamento (ou aplainamento) da superfície das madeiras após o processo de modificação térmica, pode reduzir o efeito de inativação, removendo os extrativos que migraram e desobstruindo os microporos, e, por fim, possibilitando a penetração do adesivo no material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este item apresenta informações sobre material utilizado na pesquisa e também detalha o processo de modificação térmica o qual o mesmo foi submetido. Na sequência, são apresentados aspectos sobre a confecção de corpos de prova e por fim são descritos os ensaios aplicados para a avaliação física e mecânica do material. O processo de modificação térmica, confecção dos corpos de prova e os ensaios físicos e mecânicos, foram realizados nos laboratórios de usinagem da madeira, tecnologia da madeira e anatomia da madeira, da Universidade Federal do Paraná.

3.1 MATERIAL

O material utilizado no estudo foi composto por peças de madeira serrada, da espécie *Pinus taeda* L., de um lote proveniente de um reflorestamento da empresa Berneck, localizado no município de Curitiba no estado de Santa Catarina. Foram selecionadas seis peças, que inicialmente encontravam-se no formato de tábuas com dimensões de 3,5 cm x 14,5 cm x 390 cm, já devidamente secas (Figura 5 - A). Tendo em vista que dentro do lote havia tábuas com densidades variadas, fato evidenciado pela variação da quantidade de anéis presentes na seção transversal (topo) das mesmas (Figura 5 - B), buscou-se selecionar peças de forma a abranger toda a gama de densidades de forma equilibrada, evitando também defeitos e pontos com a presença da medula.

FIGURA 5 - (A) DIMENSÕES INICIAIS DO MATERIAL (B) ANÉIS DE CRESCIMENTO NO TOPO DAS TÁBUAS.



(A)

FONTE: O autor (2019).



(B)

FONTE: O autor (2019).

Cada tábua foi seccionada em quatro partes (amostras), cada uma com 98 cm de comprimento, possibilitando a entrada do material na estufa para o processo de modificação térmica. Após o seccionamento, o material foi disposto em uma câmara climatizada - com 20 ± 3 °C de temperatura e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa do ar – para o seu condicionamento, onde permaneceu por 30 dias (Figura 6).

FIGURA 6- CONDICIONAMENTO DO MATERIAL EM CÂMARA CLIMATIZADA.



FONTE: O autor (2019).

3.2 MODIFICAÇÃO TÉRMICA

A modificação térmica da madeira foi realizada, com o material em umidade de equilíbrio (12%), e de acordo com o processo patenteado por Severo e Calonego (2011): Processo de modificação térmica por irradiação de calor, para a melhora da estabilidade dimensional e da durabilidade biológica de madeira sólida (INPI – PI0902138-8 A2).

3.2.1 Equipamento de aquecimento

O processo térmico foi realizado em uma estufa laboratorial elétrica, da marca Marconi, modelo MA 035. Como a estufa não possibilitava a opção de desligamento da circulação interna de ar, as aberturas de saída de ar desse sistema, que estavam direcionadas para o material em tratamento, foram bloqueadas com um anteparo metálico, evitando assim que o ar recirculado atingisse de forma direta as madeiras.

No interior da estufa o material disposto de forma gradeada em duas camadas, com espaçadores metálicos de 3 cm. A primeira camada foi elevada aproximadamente 30 cm, em relação à base onde estão localizadas as resistências, evitando assim um aquecimento não uniforme (Figura 7 - A). Além disso, o topo das peças foi selado com silicone resistente a altas temperaturas (até 316 °C) (Figura 7 - B) conforme orientado por Severo e Calonego (2009).

FIGURA 7- (A) GRADEAMENTO DO MATERIAL NO INTERIOR DA ESTUFA ELÉTRICA
(B) SELAMENTO DOS TOPOS COM SILICONE.



(A)

FONTE: O autor (2019).



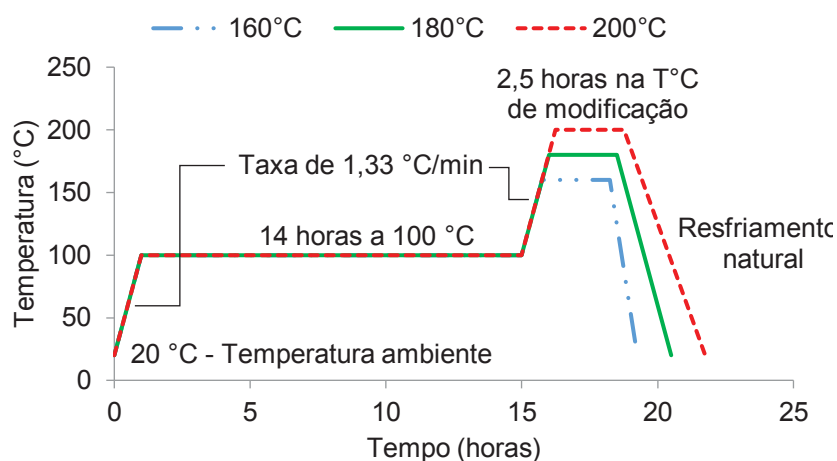
(B)

FONTE: O autor (2019).

3.2.2 Rampa de aquecimento

A modificação térmica seguiu a rampa de aquecimento apresentada na Figura 8, que, em uma primeira etapa, a temperatura foi elevada a um taxa de 1,33°C/min até 100°C, onde permaneceu por 14 horas. Na sequência, a temperatura foi elevada novamente, com a mesma taxa de aquecimento (1,33°C/min) até as temperaturas de tratamento, que foram 160, 180 e 200°C, permanecendo neste patamar por 2,5 horas.

FIGURA 8 - RAMPA DE AQUECIMENTO DO PROCESSO DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA



FONTE: O autor (2019).

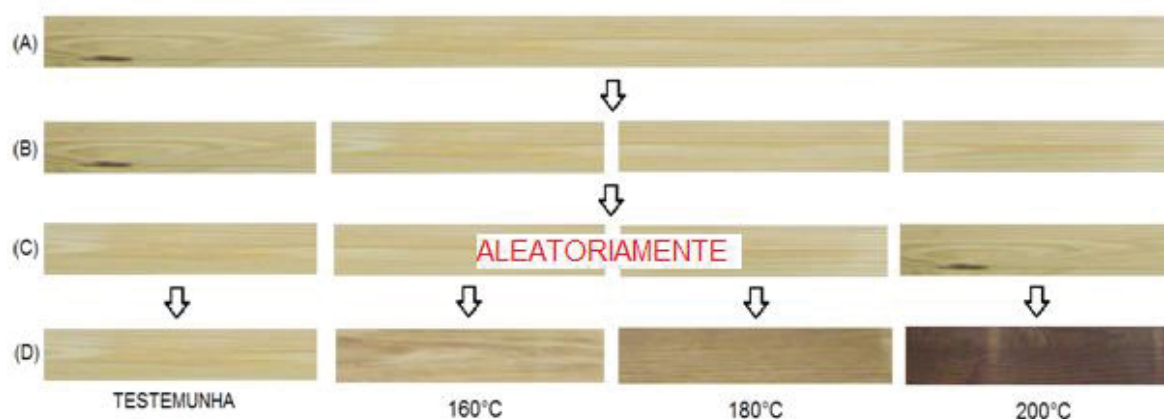
Após o período de 2,5 horas, na temperatura de cada tratamento, a estufa foi desligada, permanecendo fechada até atingir no seu interior uma temperatura próxima a do ambiente, evitando choques térmicos. Este processo resultou em diferentes tempos de exposição das amostras ao calor para cada tratamento, apresentados na Tabela 1, onde não foi considerado o tempo de resfriamento natural.

TABELA 1 - TEMPOS DE EXPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS AO CALOR PARA OS DIFERENTES TRATAMENTOS (160°C, 180°C E 200°C)

Tratamento	Tempo de exposição ao calor
160°C	18 horas e 15 minutos
180°C	18 horas e 30 minutos
200°C	18 horas e 45 minutos

Cada uma das quatro amostras de uma mesma tábua foi submetida a tratamento distinto, ou foi termomodificada aplicando umas das três temperaturas de modificação térmica (160, 180 e 200°C) ou representou uma amostra testemunha, sem nenhum tratamento térmico (Figura 9).

FIGURA 9 - ETAPAS ATÉ A MODIFICAÇÃO TÉRMICA: (A) TÁBUA NAS DIMENSÕES ORIGINAIS; (B) SECCIONAMENTO DE CADA TÁBUA EM QUATRO PARTES (AMOSTRAS); (C) ALEATORIZAÇÃO DAS AMOSTRAS E (D) TRATAMENTOS DISTINTOS DE CADA AMOSTRA.



FONTE: O autor (2019).

Os quatro tratamentos (Testemunha+3 temperaturas) foram aplicados nas amostras de forma aleatória conforme a Figura 9, ou seja, um mesmo tratamento não foi aplicado sempre em uma amostra de uma mesma posição da tábua. Posteriormente os processos de modificação térmica, o material voltou para a câmara climatizada, com 20 ± 3 °C de temperatura e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa do ar, onde foi devidamente gradeado e permaneceu por mais 60 dias até a sua estabilização da massa.

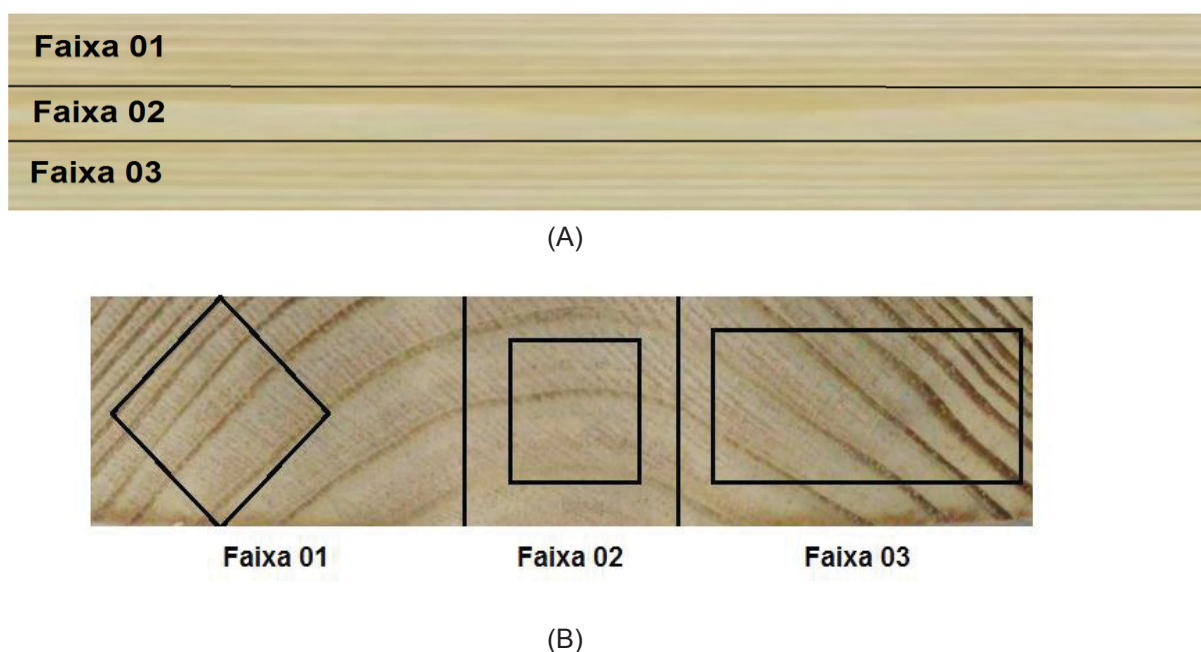
3.3 CORPOS DE PROVA

Após o período de climatização do material termo-modificado, iniciou-se a confecção dos corpos de prova para os ensaios físicos e mecânicos de acordo com as respectivas normas (COPANT 460 e 461 (1972); COPANT 555 (1973); ASTM D 143 (2014); ASTM D 905 (2008)). A escolha das normas foi balizada respeitando as limitações dimensionais do material disponível, considerando que os corpos de prova exigidos pela a norma brasileira NBR 7190 (1997) ultrapassavam as dimensões do material disponível.

Cada amostra originou corpos de prova de forma a abranger toda gama de ensaios físicos e mecânicos a serem realizados, buscando um aproveitamento máximo do material e seguindo as prescrições da normalização adotada quanto às dimensões e à orientação em relação aos três planos anatômicos (radial, tangencial e longitudinal).

Os corpos de prova foram obtidos a partir das amostras conforme o plano de corte da Figura 10 - A. Os corpos de prova para os ensaios físicos e à resistência à compressão paralela às fibras foram retirados da faixa 01. Considerando que para determinar os valores de inchamento em cada direção anatômica, são necessárias amostras orientadas, foi preciso executar cortes inclinados (Figura 10 – B) a fim de obter tal característica. A partir da faixa 02 foram obtidos os corpos de prova dos ensaios de resistência à flexão, que também devem ser orientados, porém a posição de retirada dos mesmos já promovia tal característica não necessitando cortes inclinados. Por fim, a partir da faixa 03 foram retiradas as lamelas para a posterior colagem e confecção dos corpos de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola.

FIGURA 10 - PLANO DE CORTE DOS CORPOS DE PROVA (A) SEÇÃO TANGENCIAL, (B) SEÇÃO TRANSVERSAL.



FONTE: O autor (2019)

A Tabela 2 contém as quantidades de corpos de prova confeccionados e ensaiados para cada propriedade física e mecânica analisada. Após a confecção, os corpos de prova, foram novamente dispostos na câmara climatizada – com $20 \pm 3^\circ\text{C}$ de temperatura e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa do ar – até atingirem massa constante para então serem efetuados os respectivos ensaios físicos e mecânicos.

TABELA 2 - QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA POR TRATAMENTO

Propriedades		Tratamento				Total
		Testemunha	160°C	180°C	200°C	
Físicas	Perda de massa	6	6	6	6	24
	Teor de umidade de equilíbrio	30	30	30	30	120
	Estabilidade dimensional	30	30	30	30	120
	Densidade aparente	30	30	30	30	120
	Molhabilidade	6	6	6	6	24
Mecânicas	Resistência à compressão paralela às fibras	30	30	30	30	120
	Resistência à flexão estática	17	17	17	16	67
	Resistência ao cisalhamento na linha de cola	36	36	36	36	144
	Ondas de tensão	17	17	17	16	67
	Ultrassom	17	17	17	16	67

FONTE: O autor (2008).

3.4 AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS

Para a avaliação das propriedades físicas das madeiras, testemunha e termomodificadas, foram utilizados corpos de prova com dimensões de 2,5 cm x 2,5 cm x 10 cm, devidamente orientados em relação aos três planos anatômicos do material. Somente para a avaliação da perda de massa, foram utilizadas as próprias amostras, nas dimensões aproximadas de 3,5 cm x 14,5 cm x 97 cm, logo após o processo de modificação térmica.

3.4.1 Determinação da perda de massa

A determinação da perda de massa das madeiras, durante o processo de modificação térmica, foi realizada aplicando a Equação 1, na qual são utilizados os valores de massa das amostras antes e após a aplicação do processo térmico, registradas por meio de uma balança digital (0,01g de precisão). Para a determinação da massa inicial seca (M_s) antes do processo térmico, foi necessário desconsiderar a umidade presente nas amostras neste primeiro momento. Assim a umidade foi determinada por meio do método resistivo e a massa inicial seca das amostras foi calculada aplicando a Equação 2, procedimento de cálculo também foi utilizado por Silva et al. (2013).

$$PM = \frac{M_s - M_t}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

onde:

PM = Perda de massa (%)

Ms = Massa inicial seca (g)

Mt = Massa final após a modificação térmica (g)

$$Ms = \frac{(100 \times Mi)}{(U + 100)} \quad (2)$$

onde:

Ms = Massa inicial seca (g)

Mi = Massa inicial úmida (g)

U = Umidade da amostra (%).

3.4.2 Determinação do teor de umidade de equilíbrio

A determinação do teor de umidade de equilíbrio para os diferentes tratamentos foi realizada de acordo com a norma COPANT 460 (1972). Os corpos de prova foram dispostos em uma câmara climatizada com $20 \pm 3^\circ\text{C}$ de temperatura e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa do ar até atingirem massa constante (massa inicial), a qual foi mensurada através de uma balança digital (0,01g de precisão). Na sequência, as amostras foram secas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante (massa seca), a qual foi novamente mensurada. O teor de umidade de equilíbrio foi calculado aplicando a Equação 3.

$$\text{TUE} = \frac{Mi - Ms}{Ms} \times 100 \quad (3)$$

onde:

TUE = Teor de umidade de equilíbrio (%)

Mi = Massa inicial em equilíbrio higroscópico (g)

Ms = Massa seca (g).

3.4.3 Determinação da estabilidade dimensional

Para avaliar a estabilidade dimensional das madeiras, testemunha e termomodificadas, foram determinados os valores de taxa de absorção de água e variação volumétrica (inchamento) do material quando imerso em água.

Após a estabilização das amostras, atingindo equilíbrio higroscópico (variação de massa $\leq 0,5\%$, entre duas medições, em um intervalo de 24h), as mesmas foram imersas em água por um período de duas horas. Em seguida, as amostras foram pesadas em uma balança digital (0,01g de precisão) e suas dimensões foram mensuradas, nas direções tangencial, radial e longitudinal,

por meio de um micrometro digital (0,01mm de precisão). Na sequência, os corpos de prova foram secos em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, até obterem massa constante, sendo sua massa e dimensões novamente aferidas. Os cálculos da taxa de absorção e da variação volumétrica foram realizados a partir das Equações 4 e 5, procedimento de cálculo também utilizado por Cademartori (2012).

$$TA = \frac{(M_u - M_i)}{M_i} \times 100 \quad (4)$$

$$\alpha_v = \frac{(V_u - V_i)}{V_i} \times 100 \quad (5)$$

onde:

TA = Taxa de absorção (%)
 M_u – Massa na condição úmida (após 2 horas de imersão) (g)
 M_i = Massa inicial (g) (equilíbrio higroscópico)
 α_v = Variação volumétrica (%)
 V_u = Volume na condição úmida (após 2 horas de imersão) (cm³)
 V_i = Volume inicial (cm³) (equilíbrio higroscópico)

3.4.4 Determinação densidade aparente

Após o processo de secagem das amostras em estufa, foi determinada a densidade aparente a 0% de umidade de acordo com a norma COPANT 461 (1972). Para tal, as dimensões dos corpos de prova foram mensuradas por meio de um micrômetro digital (0,01mm de precisão) para a determinação do volume e utilizou-se a massa seca das amostras para o cálculo, que foi realizado aplicando a Equação 6.

$$\rho_{0\%} = \frac{M_s}{V_s} \times 100 \quad (6)$$

onde:

$\rho_{0\%}$ = Massa específica aparente a 0% de umidade (g/cm³)
 M_s = Massa seca (g)
 V_s = Volume seco (cm³)

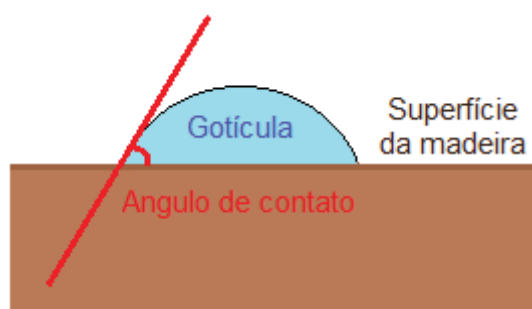
3.4.5 Determinação da molhabilidade

A avaliação da molhabilidade das madeiras, testemunha e termomodificadas, foi realizada por meio da técnica da gota séssil, seguindo um procedimento utilizado por Cademartori (2012), na qual uma gotícula de

água deionizada de 5 μ l é depositada sobre a superfície dos materiais, em três pontos distintos e na sequência são mensurados os ângulos de contato (Figura 11 - A), formado entre a gotícula e o material, em diferentes instantes. O valor final considerado é determinado a partir da média aritmética das leituras nos três pontos.

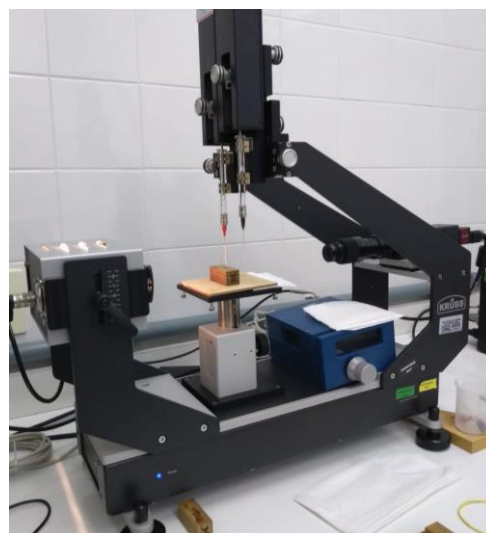
O ensaio foi realizado em um goniômetro Krüss DSA25 (Figura 11 - B) e os ângulos determinados pelo método de cálculo que relaciona a base e altura da gotícula. A leitura dos ângulos foi realizada nos instantes 5, 15, 30 e 60 segundos após a deposição da gotícula, em faces tangencial e radial de amostras de 2,0 cm x 2,0 cm x 4,0 cm. As amostras se encontravam em equilíbrio higroscópico e, cada face ensaiada passou por um processo de aplainamento antes do ensaio.

FIGURA 11 – (A) ÂNGULO DE CONTATO ENTRE GOTÍCULA DE ÁGUA E SUPERFÍCIE DO MATERIAL (B) GONIÔMETRO.



(A)

FONTE: O autor (2019)



(B)

FONTE: O autor (2019)

3.5 AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

A avaliação mecânica do material foi realizada por meio de ensaios destrutivos e ensaios não-destrutivos especificados nos subitens seguintes.

3.5.1 Ensaios destrutivos

Para a avaliação mecânica destrutiva foi utilizada uma máquina universal de ensaios da marca Emic, modelo DL30000 com capacidade para

300 kN onde foram realizados ensaios de resistência à compressão paralela às fibras, resistência à flexão estática e também o ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola das madeiras testemunha e termomodificadas.

3.5.1.1 Resistência à compressão paralela às fibras

Os ensaios de resistência à compressão paralela às fibras foram realizados seguindo as orientações da norma ASTM D 143 (2014). Para tal, foram usados corpos de prova com dimensões de 2,5 cm x 2,5 cm x 10 cm com controle de velocidade de carga igual a 0,3 mm/min (Figura 12).

FIGURA 12 - ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS EM MADEIRA DE *PINUS*.



FONTE: O autor (2019)

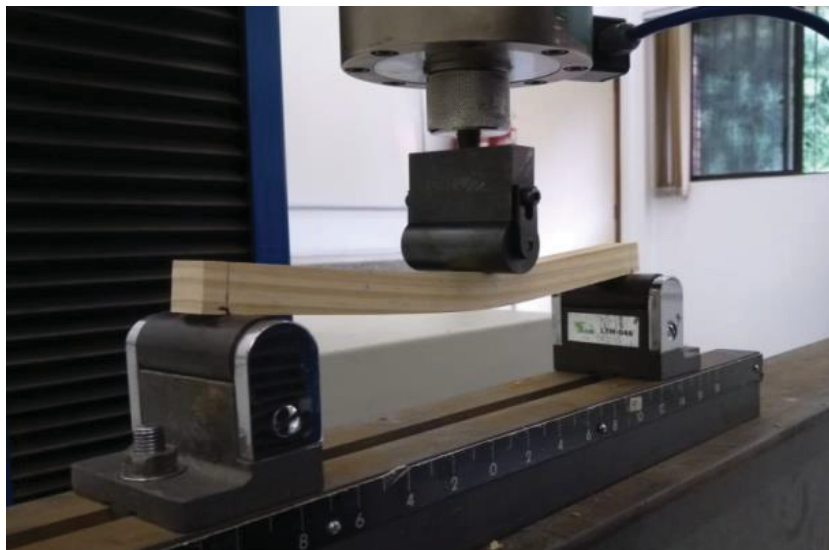
3.5.1.2 Resistência à flexão estática

Os ensaios de resistência à flexão estática foram realizados seguindo as orientações da norma COPANT 555 (1974). Tal norma foi adotada, considerando a possibilidade de emprego de corpos de prova com dimensões reduzidas, devido a limitações dimensionais do material termomodificado e também buscando uma maior amostragem. Assim, foram ensaiados 17 corpos de prova por tratamento térmico, com dimensões de 2,0 cm x 2,0 cm x 30,0 cm, com controle de velocidade de carga igual a 1,0 mm/min.

O ensaio ocorreu conforme o esquema estático de viga isostática bi apoiada com uma carga concentrada no centro do vão livre igual 28 cm, equivalente a 14 vezes a altura do corpo de prova (Figura 13). Com este ensaio

foi determinado o módulo de ruptura e também o módulo de elasticidade, este último calculado considerando o deslocamento do pistão de aplicação da carga como o valor da flecha.

FIGURA 13 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA EM MADEIRA DE *PINUS*.



FONTE: O autor (2019)

3.5.1.3 Resistência ao cisalhamento na linha de cola

A avaliação da adesividade foi realizada considerando a norma ASTM 2559 12A (2018), a partir da resistência ao cisalhamento na linha de cola e também verificando o percentual de falha na madeira nos corpos de prova. Para tal, foram ensaiados corpos de prova confeccionados a partir da colagem de duas lamelas de madeira (de igual tratamento), com dimensões de 1,9 cm x 6,0 cm x 20,0 cm.

Para a colagem das lamelas de madeira foi utilizado o adesivo bi componente, a base de Emulsão Polimérica de Isocianatos, EPI System 1915 associado ao endurecedor Hardener 1999, ambos da marca Akzo Nobel. O adesivo foi espalhado por meio de uma espátula e a gramatura adotada foi de 180 g/m². A prensagem das lamelas foi realizada a frio, por meio de uma prensa hidráulica manual, com capacidade para 15000 kg, onde foi aplicada uma pressão específica de 0,15 N/m² por 45 min (Figura 14 A e B). Após a prensagem, as juntas coladas foram dispostas em uma câmara climatizada (20 ± 3 °C de temperatura e 65 ± 5% de umidade relativa) por sete dias. Todas as

variáveis adotadas durante o processo de colagem foram definidas respeitando as recomendações do fabricante.

FIGURA 14 - PRENSAGEM DAS LAMELAS DE MADEIRA DE *PINUS*.



(A)

FONTE: O autor (2019)

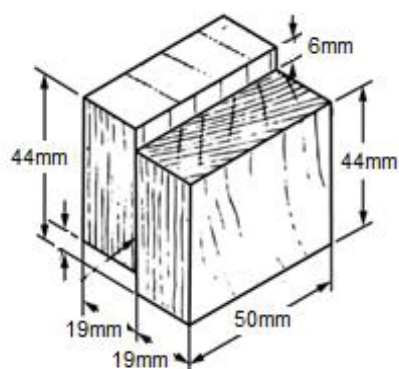


(B)

FONTE: O autor (2019)

O ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola foi realizado seguindo as orientações da norma americana ASTM D 905 (2008). Para tal, foram confeccionados 36 corpos de prova, por tratamento, com dimensões conforme a Figura 15-A, a partir das lamelas de madeira coladas.

FIGURA 15 - (A) CORPO DE PROVA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA; (B) APARATADO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA.



(A)

FONTE: Adaptado de ASTM D 905 (2013)



(B)

FONTE: O autor (2019)

Para realizar o ensaio dos corpos de prova foi acoplado um aparato (Figura 15-B), na máquina universal, para garantir uma distribuição uniforme da carga com controle de velocidade (5 mm/min).

Após as rupturas, o percentual de falha da madeira foi medido visualmente utilizando uma malha quadriculada grifada sobre uma película transparente de acetato, que foi disposta sobre a superfície cisalhada dos corpos de prova com o intuito de padronizar as leituras.

3.5.2 Ensaio não-destrutivos

Para a avaliação mecânica não destrutiva das madeiras, testemunha e termomodificadas, foram utilizados os ensaios de ondas de tensão (*Stress Wave Timer*) e ultrassom, os quais foram aplicados nos mesmos corpos de prova do ensaio de resistência à flexão antes do respectivo ensaio destrutivo, devidamente orientados, livres de defeitos ou imperfeições e cujas dimensões eram iguais a 2,0 cm x 2,0 cm x 30,0 cm.

3.5.2.1 Ensaio de ondas de tensão (*Stress Wave Timer*)

Para este ensaio foi utilizado o equipamento da marca Metriguard, modelo 239A. A velocidade de propagação da onda de tensão e o módulo de elasticidade dinâmico do material foram determinados utilizando as Equações 7 e 8, respectivamente, seguindo o procedimento de cálculo também utilizado por Cunha e Matos (2010b). Para cada amostra foram realizadas três medições, considerando como resultado, ao final do ensaio, a média aritmética dos valores.

$$V = \frac{L}{T} \quad (7)$$

onde:

V = Velocidade (cm/s)

L = Distância entre acelerômetros (cm)

T = Tempo (s)

$$MOEd = \delta \times V^2 \times \left(\frac{1}{g}\right) \quad (8)$$

onde:

MOEd = Módulo de elasticidade dinâmico (Kgf/cm²)

δ = Massa específica do material (g/cm³)

V = Velocidade (cm/s)

g = Aceleração da gravidade (9,80665 m/s²)

3.5.2.2 Ensaio de ultrassom

Para este ensaio foi utilizado o equipamento da marca Proceq, modelo Pundit lab. No equipamento foram acoplados transdutores de ponta-seca, com extremidade alongada (Figura 16), com frequência de 54 kHz, próprios para superfícies ásperas de concreto, madeira e rochas (PROCEQ, 2015). A velocidade de propagação da onda acústica e o módulo de elasticidade dinâmico do material foram determinados utilizando as Equações 9 e 10, respectivamente, procedimento de cálculo também utilizado por Stangerlin et al. (2011), Vivian et al. (2012) e Missio et al. (2013). Para cada amostra também foram realizadas três leituras do tempo de propagação da onda, considerando como resultado, ao final do ensaio, a média aritmética dos valores.

$$V = \frac{L}{T} \quad (9)$$

onde:

V = Velocidade (cm/s)

L = Distância entre transdutores (cm)

T = Tempo (s).

$$MOEd = \delta \times V^2 \quad (10)$$

onde:

MOEd = Módulo de elasticidade dinâmico (Kgf/cm²)

δ = Massa específica do material (g/cm³)

V = Velocidade (cm/s).

FIGURA 16 - TRANSDUTOR COM EXTREMIDADE LONGA (ULTRASSOM).



FONTE: O autor (2019)

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com o objetivo de diminuir o erro amostral proveniente da diferença entre diferentes indivíduos (tábuas), considerando a heterogeneidade do lote de madeiras em relação à densidade, foi adotado um delineamento experimental de blocos casualizados (DBC) (DUARTE, 1996), no qual cada tábuia representou um bloco distinto. Assim, o delineamento experimental constituiu em quatro tratamentos (testemunha, 160, 180 e 200°C), igualmente distribuídos (DBC completo) nos seis blocos (Tábuia1, Tábuia 2, Tábuia 3, Tábuia 4, Tábuia 5, Tábuia 6).

O efeito dos tratamentos e dos blocos, nas propriedades físicas e mecânicas das madeiras, foi avaliado utilizando o software IBM SPSS statistics versão 23, por meio de análises de variância (ANOVA), identificando diferenças significativas a 1% (**) e 5% (*) de probabilidade ou ausência de diferenças significativas (^{ns}) pelo teste F (RIBEIRO e CATEN, 2001). A diferenciação entre tratamentos, nos quais foram identificadas diferenças significativas, aplicou-se o teste de médias Tukey, a um nível significância de 95% (FIELD, 2013). Ao longo da apresentação de resultados e discussões também foram realizadas correlações de Pearson e análises de regressão para algumas propriedades, esta última avaliando a linha de tendência e os índices de determinação gerados gráficos de dispersão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este item apresenta os resultados e discussões sobre as propriedades avaliadas da madeira de *Pinus taeda* L. testemunha e termomodificada, e está dividido em duas partes. Na primeira parte, intitulada propriedades físicas, são apresentados e discutidos os resultados referentes à perda de massa, teor de umidade de equilíbrio, estabilidade dimensional e molhabilidade do material. A segunda parte, intitulada propriedades mecânicas, são apresentados e discutidos os resultados referentes aos ensaios destrutivos de resistência à compressão paralela às fibras, resistência à flexão estática, resistência ao cisalhamento na linha de cola e ensaios não destrutivos de ultrassom e ondas de tensão.

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

A Tabela 3 apresenta o resumo das análises de variância (ANOVA) realizadas para as propriedades físicas analisadas, onde é indicado se foram identificadas diferenças significativas entre tratamentos e blocos assim como o respectivo nível de significância.

TABELA 3 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA AS PROPRIEDADES FÍSICAS - DELINEAMENTO EM BLOCOS CASUALIZADOS

Fator de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio				
		Perda de massa	Teor de umidade de equilíbrio	Taxa de absorção	Variação volumétrica	Densidade a 0% de umidade
Tratamento	3 (2) ¹	25,7**	30,8**	245,7**	29,6**	0,00067 ^{ns}
Bloco	5	0,52 ^{ns}	0,07 ^{ns}	65,8 ^{ns}	2,5 ^{ns}	0,027**
R ²		0,9	0,95	0,71	0,81	0,87
CV %		9,97	5,66	26,30	23,53	7,00
¹	A quantidade de graus de liberdade para a propriedade perda de massa é igual a 2 devido à ausência do tratamento testemunha na análise					
**	Diferenças significativas a 1% pelo teste F.					
*	Diferenças significativas a 5% pelo teste F.					
ns	Diferenças não significativas.					

FONTE: O autor (2019)

Com exceção para a densidade aparente a 0% de umidade, o processo de modificação térmica (tratamento) apresentou efeito significativo ($P \leq 0,01$) sobre todas as propriedades físicas, ou seja, o processo alterou de alguma forma essas propriedades. Entretanto, somente para a densidade aparente a

0%, a análise de variância indicou diferenças significativas ($P \leq 0,01$) entre os blocos e, por consequência, entre as tábuas selecionadas.

A diferenciação entre blocos para a densidade aparente a 0% de umidade comprova a hipótese inicialmente levantada em relação à heterogeneidade do lote de tábuas, evidenciada pelas diferentes quantidades de anéis no topo (seção transversal) das mesmas, observadas por análise visual. Confirmando, também, o enquadramento da parte prática da pesquisa em um delineamento em blocos casualizados, para atenuar o erro relativo à heterogeneidade do material devido à diferença de densidade entre tábuas.

A Tabela 4 apresenta uma matriz de correlações de Pearson entre as propriedades físicas. É possível observar que as propriedades relativas ao teor de umidade de equilíbrio, a taxa de absorção de água e a variação volumétrica apresentaram correlações negativas fortes com a perda de massa, após o tratamento térmico (-0,93, -0,72 e -0,87, respectivamente), ou seja, são variáveis inversamente proporcionais, em que o aumento da perda de massa acarreta em redução das demais variáveis.

TABELA 4 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON - PROPRIEDADES FÍSICAS

Propriedade		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Perda de massa	(1)	1,00	-0,93	-0,72	-0,87	-0,22
Teor de umidade de equilíbrio	(2)		1,00	0,27	0,53	0,08
Taxa de absorção de água	(3)			1,00	0,80	-0,21
Variação volumétrica	(4)				1,00	0,22
Densidade aparente a 0% de umidade	(5)					1,00

Valores negativos indicam relação inversa entre propriedades

FONTE: O autor (2019)

A densidade aparente a 0%, mais uma vez se destacou em relação às outras propriedades físicas, sendo a única a apresentar correlação negativa e fraca com a perda de massa. Considerando que a densidade foi a única propriedade física sobre a qual o tratamento térmico não apresentou efeitos significativos, tal perspectiva fornece indícios do potencial da perda de massa como indicador da qualidade do processo de modificação térmica, no tocante a algumas propriedades físicas. Segundo Bal e Bektas (2012), quanto maior a perda de massa, maiores serão as alterações físicas e mecânicas do material.

A Tabela 4 indica outra correlação forte (0,80) entre as propriedades de taxa de absorção de água e variação volumétrica. Esta correlação demonstra a relação direta que as variações volumétricas possuem com as trocas de umidade (água) realizadas entre as madeiras e o ambiente. Tal variação pode ocorrer tanto devido a entrada de água, que acarreta em inchamentos, como a saída da mesma, que por sua vez causa contrações.

4.1.1 Perda de massa

A Tabela 5 apresenta os valores de perda de massa do material após o processo de modificação térmica nas três diferentes temperaturas. A variação da temperatura de 160 para 180°C, não foi suficiente para acarretar em valores de perda de massa, estatisticamente diferentes, durante o processo térmico. Apenas o material submetido a 200°C apresentou comportamento estatisticamente diferente, em relação aos demais, causando um aumento de 78% na perda de massa.

TABELA 5 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS - PERDA DE MASSA

Tratamento	Perda de massa	Coefficiente de variação
	(%)	(%)
160°C	4,2 a	13,5
180°C	4,9 a	6,8
200°C	8,1 b	10,6

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferenças significativas a 5% de probabilidade.

FONTE: O autor (2019)

A perda de massa da madeira durante o processo de modificação térmica está relacionada com a degradação dos principais componentes da parede celular (hemiceluloses, celulose e lignina). Sendo as hemiceluloses os componentes que mais contribuem com a perda de massa, pois são mais susceptíveis à degradação térmica (STAMM, 1965; SILVA et al., 2013).

Cademartori et al.(2015), por meio de ensaios de espectroscopia infravermelha, observaram que as maiores variações em função da temperatura se relacionavam com a degradação de hemiceluloses. A redução de monossacarídeos (xilose, galactose, manose e arabinose) formadores das hemiceluloses, após tratamentos térmicos, aponta a maior suscetibilidade, das mesmas, a degradação térmica (MBURU, 2008).

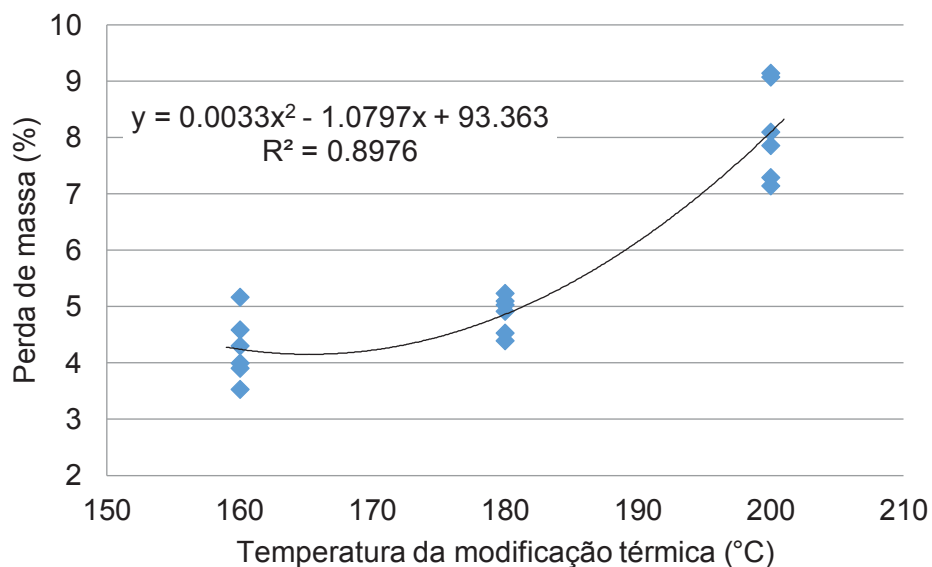
Os valores médios de perda de massa de 4,3%, 4,9% e 8,1%, para as temperaturas de 160°C, 180°C e 200°C, respectivamente (Tabela 5), estão próximos aos de outros pesquisadores (POUBEL et al., 2013). Poubel et al. (2013) observaram 10,41% de perda de massa em amostras pequenas (25 mm x 25 mm x 50 mm) de *Pinus caribaea* termomodificadas a 200°C por 2 horas.

Pincelli et al. (2002), termomodificando amostras de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, encontraram valores de perda de massa de 1,02% e 4,17% para as temperaturas de 160 e 180°C. A diferença entre os valores do presente trabalho e o percentual encontrado por Pincelli et al. (2002), referente à temperatura de 160°C, pode estar relacionada a uma possível diferença de tempo de exposição do material à temperatura de tratamento, que no caso do trabalho citado não foram revelados, e como observado anteriormente apresentam influência sobre a perda de massa.

Silva (2012) observou perdas de massa equivalentes a 1,4%, 2,81% e 5,9% em amostras de *Pinus taeda* termomodificadas a 160, 180 e 200°C, respectivamente, por 2 horas. Os valores se mostraram um pouco inferiores aos encontrados no presente trabalho, fato que também pode ser atribuído ao menor tempo de exposição às temperaturas de tratamento e também à atmosfera de gás nitrogênio empregada durante o processo. De acordo com Silva et al. (2013), o tratamento térmico de madeiras circundadas por uma atmosfera de gás nitrogênio evita a oxidação das mesmas, acarretando em menores taxas de degradação.

Por meio da Figura 17 é possível observar um aumento da perda de massa do material termo-modificado em função da temperatura de tratamento. Este comportamento também foi observado em outros trabalhos (KOL et al., 2017; CADEMARTORI et al., 2015; ESTEVES et al., 2007).

FIGURA 17 - PERDA DE MASSA DO MATERIAL (PINUS TAEDA) APÓS PROCESSO DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA EM TRÊS NÍVEIS DE TEMPERATURA (160°C, 180°C E 200°C).



FONTE: O autor (2019)

Além da temperatura, o tempo de exposição também influencia na perda de massa, sendo possível alcançar valores iguais de perda de massa com temperaturas distintas, alterando o tempo de tratamento (ESTEVEZ et al., 2007; SILVA et al., 2013). Entretanto, o efeito da temperatura é mais forte sobre as propriedades da madeira quando comparado com a quantidade de tempo de exposição da madeira ao calor (BATISTA et al., 2011; ATES et al., 2009; MITCHELL, 1988 apud KORKUT et al., 2008).

4.1.2 Teor de umidade de equilíbrio

Os valores de teor de umidade de equilíbrio do material testemunha e termomodificado são apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS - TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO

Tratamento	Teor de umidade de equilíbrio (%)	Coeficiente de variação (%)
Testemunha	12,7 a	2,5
160°C	10,7 b	8,1
180°C	9,7 c	2,4
200°C	7,2 d	6,2

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferenças significativas a 5% de probabilidade.

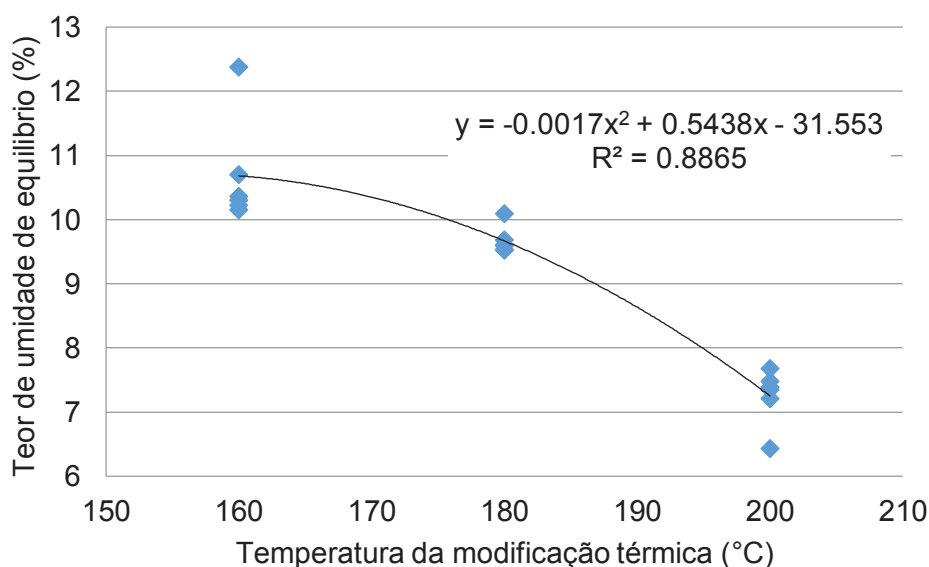
FONTE: O autor (2019)

Cada nível de temperatura imposto nos tratamentos térmicos acarretou em teores de umidade de equilíbrio estatisticamente diferentes. A maior redução do teor de umidade de equilíbrio alcançada foi de 42,5% e ocorreu com o maior valor de temperatura (200°C). As reduções, também significativas, alcançadas aplicando temperaturas de 160 e 180°C foram 15,7%, 23,6%, respectivamente (Tabela 6).

O decréscimo do teor de umidade de equilíbrio a partir da modificação térmica está diretamente relacionado à redução da quantidade de hidroxilas livres (grupos OH), devido à degradação das hemiceluloses e zonas amorfas da celulose (ESTEVES et al., 2007).

A Figura 18 indica um decréscimo do teor de umidade de equilíbrio do material termo-modificado em função da temperatura de tratamento, sendo, tal comportamento, também observado em outros trabalhos (CADEMARTORI et al., 2015; CARVALHO et al., 2015).

FIGURA 18– TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO DO MATERIAL (PINUS TAEDA) APÓS PROCESSO DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA EM TRÊS NÍVEIS DE TEMPERATURA (160°C, 180°C E 200°C).



FONTE: O autor (2019)

Carvalho et al.(2015) observaram uma redução de 13,6% no teor de umidade de equilíbrio de amostras de *Pinus sp.* termomodificadas a 180°C, entretanto, o aumento da temperatura para 200°C não acarretou em diferenças significativas em tal propriedade. Apenas a partir de 220°C, foi observada uma

maior redução no teor de umidade de equilíbrio. Esteves et al.(2007) também observaram reduções para amostras de *Pinus pinaster*, as quais alcançaram teores de umidade iguais a 5,4 % e 4,5% para 190 e 210°C, respectivamente.

Segundo Kol et al. (2017), a redução do teor de umidade de equilíbrio das madeiras, por meio da modificação térmica, é o maior ganho em relação às madeiras não tratadas, pois acarreta em menores dilatações e retrações sem a necessidade do uso de produtos repelentes de água. A redução do teor de umidade de equilíbrio possui grande importância, pois amplia as possibilidades de uso do material, tornando-o, por exemplo, mais estável e biologicamente resistente quando aplicado em ambientes com maior umidade.

4.1.3 Estabilidade dimensional

A análise da estabilidade dimensional do material foi conduzida a partir da determinação da taxa absorção do mesmo, quando imerso em água durante um período de 2 horas, e a sua variação volumétrica devido a inchamentos após o processo de imersão.

4.1.3.1 Taxa de absorção

A Tabela 7 apresenta os valores referentes à taxa de absorção de água das amostras testemunha e termomodificadas nas diferentes temperaturas aplicadas, após a imersão em água por um período de duas horas.

TABELA 7 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS - TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Tratamento	Taxa de absorção (%)	Coefficiente de variação (%)
Testemunha	18,6 ab	31,0
160°C	23,8 a	22,4
180°C	26,8 a	32,9
200°C	12,2 b	28,8

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferenças significativas a 5% de probabilidade.

FONTE: O autor (2019)

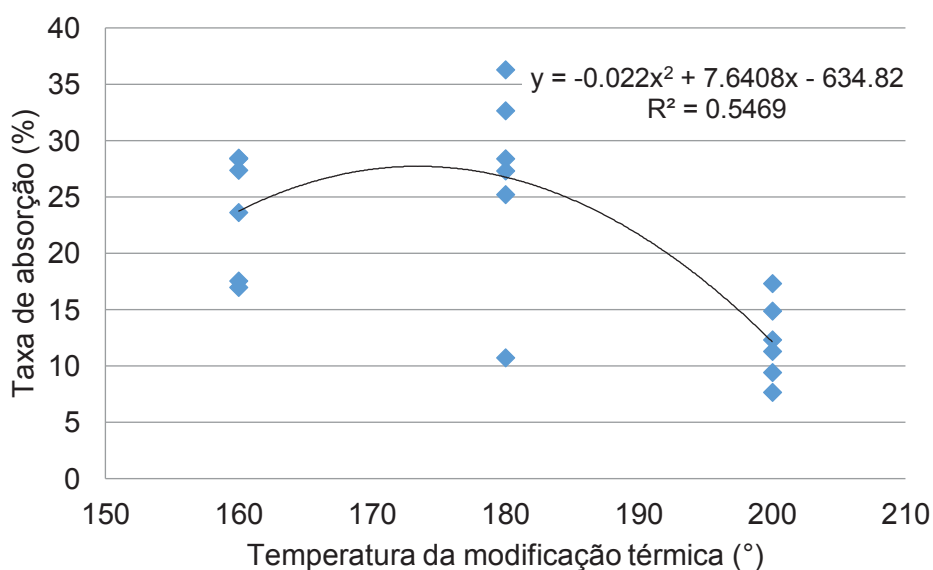
Os dois primeiros níveis de temperatura (160°C e 180°C) não ocasionaram diferenças, significativas, da taxa de absorção de água do material submetido ao processo de modificação térmica em relação às amostras testemunha. Contudo, o nível de temperatura de 200°C ocasionou

uma redução da taxa de absorção equivalente a aproximadamente 47% em relação à média dos valores encontrados para os demais tratamentos (Testemunha, 160 e 180°C) (Tabela 7).

Embora o tratamento térmico a 200°C tenha ocasionado uma redução de 34,4% na taxa de absorção de água em relação ao valor médio encontrado para as amostras testemunha, não foram observadas diferenças significativas entre os dois tratamentos. A variabilidade dos valores obtidos no ensaio em questão pode ter contribuído para tal comportamento, expressa nos elevados coeficientes de variação, determinados para cada tratamento (Tabela 7), atrelado ao coeficiente de variação geral do modelo, equivalente a 26,3%, maior valor encontrado entre as propriedades físicas (Tabela 3).

A Figura 19 apresenta o comportamento da taxa de absorção em função do aumento da temperatura.

FIGURA 19 – TAXA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DO MATERIAL (*PINUS TAEDA*) APÓS PROCESSO DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA EM TRÊS NÍVEIS DE TEMPERATURA (160°C, 180°C E 200°C).



FONTE: O autor (2019)

Embora o índice de determinação (R^2) tenha resultado em um valor baixo (Figura 19), muito provavelmente por causa da variabilidade e heterogeneidade do material anteriormente comentada, verifica-se uma queda da absorção de água do material por meio do emprego de temperaturas mais elevadas (200°C). Segundo Kartal et al. (2007), quanto maior for a temperatura

de tratamento e o tempo de exposição do material ao calor, menor será a sua quantidade de absorção de água.

O tratamento térmico e consequente degradação de carboidratos reduzem a concentração de grupos hidroxila e acessibilidade dos mesmos, refletindo em uma menor absorção de água (KOL et al., 2010; ATES et al., 2009; KARTAL et al., 2007).

4.1.3.2 Variação volumétrica

A Tabela 8 apresenta os valores referentes à variação volumétrica das amostras testemunha e termomodificadas nas diferentes temperaturas aplicadas, após a imersão em água durante duas horas.

TABELA 8 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS - VARIAÇÃO VOLUMÉTRICA

Tratamento	Variação volumétrica	Coefficiente de variação
	(%)	(%)
Testemunha	5,4 a	17,2
160°C	7,0 a	23,2
180°C	6,6 a	27,4
200°C	2,1 b	27,4

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferenças significativas a 5% de probabilidade.

FONTE: O autor (2019)

As amostras testemunha não diferiram estatisticamente dos dois primeiros níveis de temperatura (160°C e 180°C) do processo térmico. O tratamento a 200°C ocasionou uma redução da variação volumétrica, equivalente a 67% em relação à média dos valores encontrados para os demais tratamentos (Tabela 8).

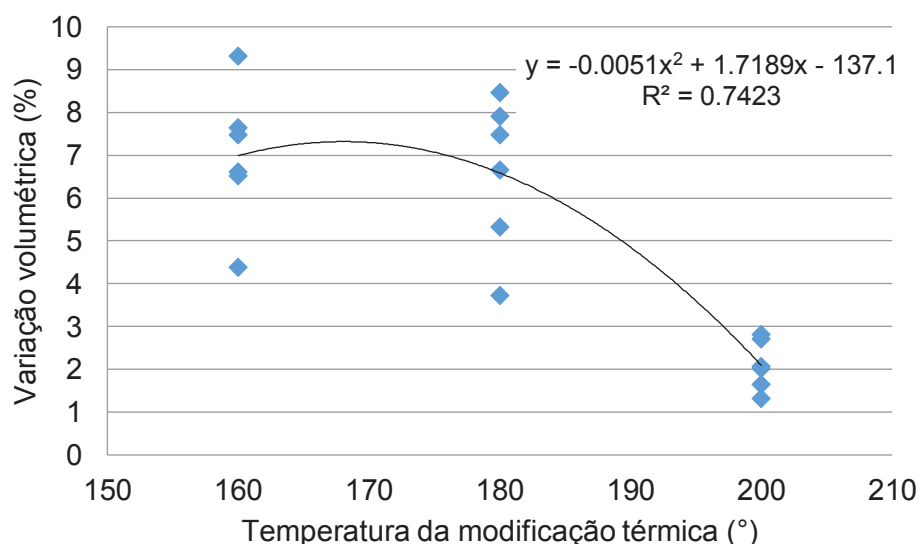
O comportamento do material termo-tratado, em relação à variação volumétrica, foi bastante similar ao observado para a taxa de absorção, item 4.1.3.1, que pode ser explicado pela relação direta entre as duas propriedades já citada anteriormente, expressa pelo coeficiente de correlação de Pearson igual a 0,80 (Tabela 4). Segundo Kol (2010) as variações dimensionais, como inchamentos e retrações da madeira, ocorrem abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), devido à absorção ou perda de água.

A redução da higroscopicidade de madeiras termomodificadas e, por consequência, menor absorção de água da parede celular do material, alteram

as variações dimensionais acarretando em menores resultados de inchamento e retração. Além disso, a estabilidade dimensional das madeiras termomodificadas é alterada positivamente com o aumento do teor de lignina, somado a não degradação dos carboidratos com estrutura cristalina (ATES et al., 2009).

A Figura 20 indica um decréscimo de variação volumétrica do material termo-modificado em função da temperatura de tratamento, que também foi observado em outros trabalhos (ESTEVES et al., 2007; KOL et al., 2010; BATISTA et al., 2011).

FIGURA 20 - VARIACÃO VOLUMÉTRICA DO MATERIAL (PINUS TAEDA) APÓS PROCESSO DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA EM TRÊS NÍVEIS DE TEMPERATURA (160°C, 180°C E 200°C).



FONTE: O autor (2019)

Kol (2010) observou uma redução de 63,9% no inchamento volumétrico após o tratamento térmico, a 212°C, de amostras de *Pinus nigra*. Esteves et al. (2007) também observaram melhoras na estabilidade dimensional de amostras de *Pinus pinaster* termomodificadas a 190, 200 e 210°C.

4.1.4 Densidade aparente a 0% de umidade

A Tabela 9 apresenta os valores de densidade aparente a 0% de umidade do material testemunha e madeiras termomodificadas. Conforme indicado anteriormente na Tabela 3, o processo térmico não teve efeitos significativos sobre tal propriedade.

TABELA 9 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS - DENSIDADE APARENTE A 0% DE UMIDADE

Tratamento	Densidade a 0% de umidade	Coefficiente de variação
	(g/cm ³)	(%)
Testemunha	0,526	19,0
160°C	0,531	10,7
180°C	0,526	17,7
200°C	0,507	18,8

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferenças significativas a 5% de probabilidade.

FONTE: O autor (2019)

Outros autores também observaram ausência de alterações na densidade das madeiras termomodificadas. Batista et al.(2011) não observaram diferenças significativas na densidade de amostras de *Eucalyptus grandis* termomodificadas a 200°C em relação às amostras testemunha. Somente a partir de 230°C foram verificadas diferenças significativas na densidade.

Embora haja perda de massa durante o processo térmico, conforme evidenciado no item 4.1.1, é possível que as temperaturas aplicadas no presente trabalho, cuja máxima coincide com a de 200°C aplicada no trabalho de Batista et al.(2011), provocaram redução do volume proporcional a perda de massa, não afetando a densidade. E, talvez, somente temperaturas mais elevadas, como foi o caso de Batista et al.(2011) ao aplicar 230°C, acarretem em alterações da densidade.

Cabe ressaltar que as densidades, para todos os tratamentos, se encontram dentro da faixa ideal para colagens, entre 0,40 e 0,75 g/cm³ (CALIL NETO, 2011; AZAMBUJA et al., 2004). Assim, considerando somente essa propriedade, o material se mostra adequado para passar por processos de colagem.

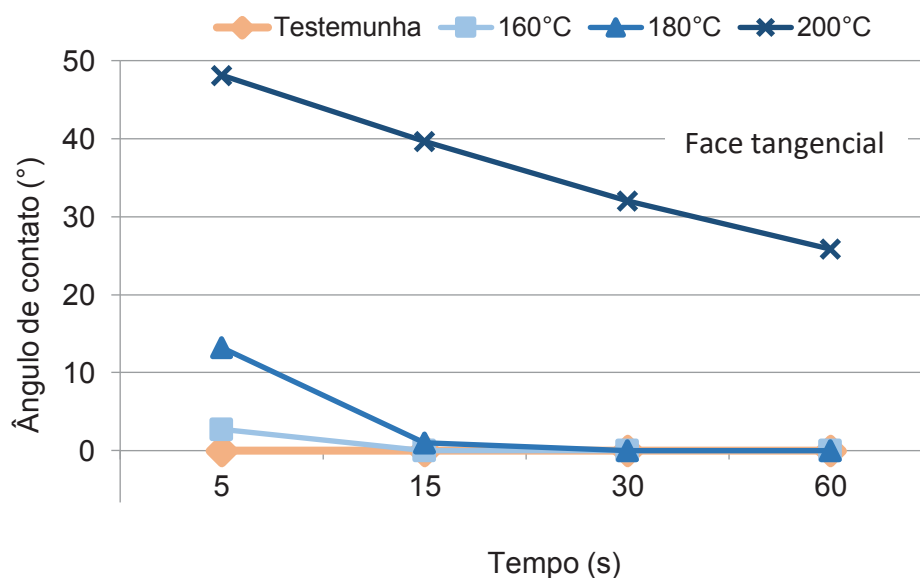
4.1.5 Molhabilidade

As Figuras 21 e 22 apresentam o comportamento do ângulo de contato das gotículas quando depositadas sobre a superfície do material testemunha e termomodificado nas diferentes temperaturas. É possível observar que a molhabilidade do material foi alterada, a partir do processo de modificação

térmica, causando um aumento dos ângulos como pode ser observado tanto na face tangencial como na face radial.

Na face tangencial ocorreu um aumento do ângulo de contato, em função do tratamento térmico, nos primeiros cinco segundos para as três temperaturas, ao passo que, na face das amostras testemunha a gotícula de água foi absorvida antes dos primeiros cinco segundos (ângulo de contato igual à zero). Entretanto, tal aumento apresenta um comportamento decrescente em relação ao tempo. No instante de 15 segundos após a deposição das gotículas, o comportamento das madeiras termomodificadas a 160 e 180°C se igualou à testemunha acarretando em ângulos iguais a zero. A maior variação de molhabilidade ocorreu para a temperatura de 200°C, que promoveu um ângulo de 48,1° no instante de cinco segundos, reduzindo após 55 s para 25,8° no instante de 60 s (Figura 21).

FIGURA 21 - ÂNGULO DE CONTATO, NA FACE TANGENCIAL DO MATERIAL (PINUS TAEDA), ANTES E APÓS PROCESSO DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA EM TRÊS NÍVEIS DE TEMPERATURA (160°C, 180°C E 200°C).

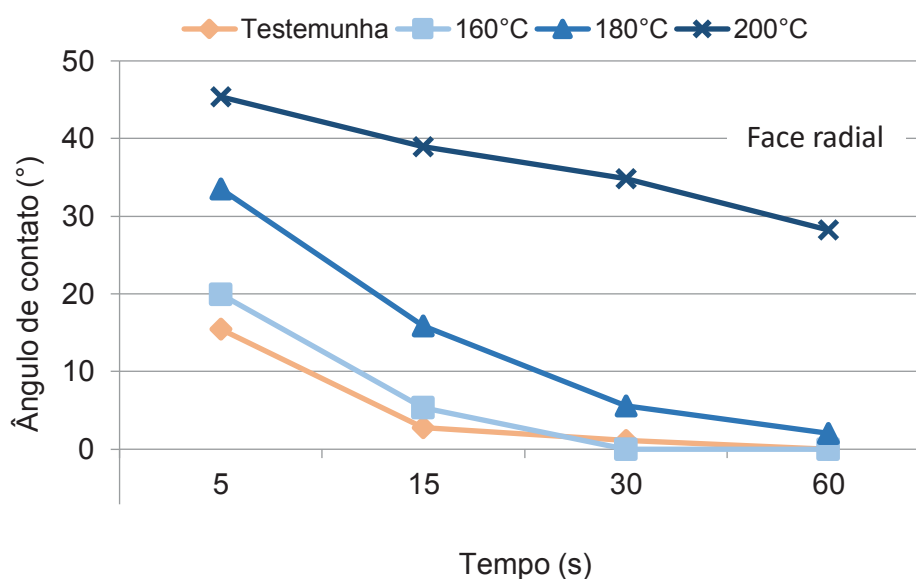


FONTE: O autor (2019)

Na face radial, apresentando um comportamento similar à face tangencial, o tratamento com temperatura de 200°C foi novamente o que mais perpetuou o aumento do ângulo de contato devido ao processo térmico, iniciando com 45,4° em cinco segundos, reduzindo para 28,2° no instante de 60 segundos. Nesta face, o tratamento com temperatura de 180°C foi mais

efetivo em relação ao aumento do ângulo de contato, se destacando mais em relação à amostra testemunha nos três primeiros instantes (5, 15 e 30 s), porém se igualando à mesma, no instante de 60 s, com um ângulo igual a zero. O material termo-tratado a 160°C apresentou comportamento similar à amostra testemunha (Figura 22).

FIGURA 22 - ÂNGULO DE CONTATO, NA FACE RADIAL DO MATERIAL (*PINUS TAEDA*), ANTES E APÓS PROCESSO DE MODIFICAÇÃO TÉRMICA EM TRÊS NÍVEIS DE TEMPERATURA (160, 180 E 200°C).



FONTE: O autor (2019)

O aumento ténue dos ângulos de contato na face radial pode estar relacionado à maior presença de lenho tardio, pouco presente nas faces tangenciais, e que possui uma densidade superior ao lenho inicial, sendo 100% maior em alguns casos (BARRIHELO e BRITO, 1979). Apesar disso, a partir de 30 segundos, ambas as faces, apresentaram comportamentos similares, sendo o mesmo constatado por outros autores, que também não observaram diferenças, a respeito da molhabilidade, entre as diferentes faces das madeiras termomodificadas (ESTEVES et al., 2007).

Maiores ângulos de contato, principalmente para a temperatura de 200°C, têm relação com o aumento da repelência da madeira à água, devido à redução de hemiceluloses, a partir dos processos de modificação térmica, fazendo com que as mesmas absorvam menos umidade (KOL et al., 2010; CARVALHO et al., 2015). Kartal et al. (2007) citam que a madeira,

originalmente hidrofílica, se torna hidrofóbica após processos de modificação térmica. Tal alteração permite que o material seja utilizado em ambientes sujeitos a uma maior variação de umidade sem prejudicar o desempenho, pois uma menor absorção de água resulta em uma maior estabilidade dimensional.

Por outro lado, Cademartori et al. (2015), que também relacionam a alteração da molhabilidade com modificações químicas na estrutura da madeira, especialmente com a degradação das hemiceluloses, afirmam que este comportamento retrata uma possível inativação da superfície do material, devido à redução de forças atrativas da mesma. Apesar do aplainamento das faces realizado antes do ensaio de molhabilidade, o mesmo não foi eficaz na remoção de uma possível parcela inativada da superfície da madeira, que por sua vez pode alterar a adesividade do material prejudicando a sua utilização em produtos que passem por etapas de colagem, como é o caso da tecnologia de madeira laminada colada.

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Na Tabela 10, encontra-se um resumo das análises de variância realizadas para as propriedades mecânicas de resistência à compressão paralela às fibras, resistência a flexão estática, módulo de elasticidade na flexão e resistência ao cisalhamento na linha de cola, onde é indicado se foram identificadas diferenças significativas entre tratamentos e blocos, além do respectivo nível de significância.

TABELA 10 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA PROPRIEDADES MECÂNICAS - DELINEAMENTO EM BLOCOS CASUALIZADOS

Fator de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio			
		Resistência à compressão paralela às fibras	Resistência à flexão estática	Módulo de elasticidade na flexão	Resistência ao cisalhamento na linha de cola
Tratamento	3	191,6**	405,0 ^{ns}	2245623,3 ^{ns}	40,9**
Bloco	5	508,3**	1180,9**	16005796,2**	19,7**
R ²		0,90	0,75	0,78	0,91
CV%		9,73	16,67	13,18	11,94
**		Diferenças significativas a 1% pelo teste F.			
*		Diferenças significativas a 5% pelo teste F.			
ns		Diferenças não significativas.			

FONTE: O autor (2019)

O processo de modificação térmica (tratamento) apresentou efeito significativo ($P \leq 0,01$) sobre a resistência à compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento na linha de cola, demonstrando que a modificação térmica alterou essas propriedades. Porém, o processo térmico (faixa temperaturas e tempo de exposição ao calor) não foi suficiente para causar diferenças significativas na resistência à flexão estática (MOR) e no módulo de elasticidade estático na flexão (MOE). Além disso, para todas as propriedades mecânicas analisadas foram identificadas diferenças significativas ($P \leq 0,01$) entre os blocos, mesmo comportamento observado para a densidade aparente a 0% de umidade, indicando a forte relação entre as propriedades mecânicas e a densidade das madeiras.

A Tabela 11 apresenta uma matriz de correlações de Pearson entre propriedades mecânicas, relacionando às mesmas também com as propriedades físicas anteriormente analisadas.

TABELA 11 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE PEARSON - PROPRIEDADES MECÂNICAS

Propriedade		(6)	(7)	(8)	(9)
Perda de massa	(1)	0,14	-0,37	-0,17	-0,67
Teor de umidade de equilíbrio	(2)	-0,39	0,29	-0,11	0,56
Taxa de absorção de água	(3)	-0,33	-0,07	-0,11	0,33
Variação volumétrica	(4)	-0,04	0,31	0,19	0,69
Densidade aparente a 0% de umidade	(5)	0,85	0,74	0,69	0,69
Resistência à compressão paralela às fibras	(6)	1,00	0,49	0,67	0,23
Resistência à flexão estática	(7)		1,00	0,80	0,73
Módulo de elasticidade estático na flexão	(8)			1,00	0,46
Resistência ao cisalhamento na linha de cola	(9)				1,00

Valores negativos indicam relação inversa entre propriedades

FONTE: O autor (2019)

A partir da Tabela 11, se confirmam os indícios, comentados anteriormente, onde as propriedades mecânicas apresentaram correlações fortes (0,85 e 0,74) ou, pelo menos, moderadas (0,69 e 0,69) com a densidade aparente a 0% de umidade. Batista (2012) cita que a redução da densidade das madeiras, devido à modificação térmica, pode prejudicar o material alterando negativamente as propriedades mecânicas. As correlações revelam que o vínculo existente entre as propriedades mecânicas e a densidade das madeiras, se conservou após a aplicação do tratamento térmico.

Além da densidade aparente a 0% de umidade, entre as propriedades físicas analisadas, somente a perda de massa e a variação volumétrica apresentaram uma relação com a resistência ao cisalhamento na linha de cola (0,67 e 0,69, respectivamente). Tal resultado mostra uma independência das propriedades mecânicas em relação às propriedades físicas citadas, com exceção para a densidade aparente a 0% de umidade (Tabela 11).

A perda de massa que correlacionou com quase todas as propriedades físicas, não conservou tal importância, no presente estudo, sobre as propriedades mecânicas analisadas. Tal comportamento vai contra o que foi observado por Mburu et al. (2008), que defendem a relação direta da perda de massa com as alterações das propriedades mecânicas durante o tratamento térmico, podendo, inclusive, apresentar maior influência que a temperatura imposta.

4.2.1 Resistência à compressão paralela às fibras

A Tabela 12 apresenta os valores referentes ao ensaio de resistência à compressão paralela às fibras da amostra testemunha e do material termomodificado nas diferentes temperaturas.

TABELA 12 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Tratamento	Resistência à compressão paralela às fibras (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Testemunha	43,1 a	29,0
160°C	51,9 b	17,5
180°C	49,4 ab	25,6
200°C	56,7 b	23,7

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferenças significativas a 5% de probabilidade.

FONTE: O autor (2019)

Os valores médios de resistência à compressão paralela às fibras não diferiram estatisticamente para os três níveis de temperatura impostos para cada tratamento térmico (160, 180 e 200°C), e o valor médio referente aos mesmos representou um aumento de 22,2%, em tal propriedade, em relação às amostras testemunha (Tabela 12).

Apesar do aumento expressivo, o tratamento com 180°C não se diferenciou da amostra testemunha. Nota-se que o resultado das amostras

testemunha e o tratamento a 180°C apresentaram os dois maiores coeficientes de variação (29,0% e 25,6%, respectivamente), de modo que podem ter contribuído para o comportamento, não linear, entre a propriedade mecânica e o processo térmico (Tabela 12). Os coeficientes variação elevados podem estar relacionados à variabilidade de densidades presente no lote de madeiras utilizado.

Alguns trabalhos constataram aumento na resistência à compressão de madeiras termomodificadas (KOL, 2010; SILVA et al., 2013) em contrapartida, outros observaram reduções em tal propriedade (ATES et al., 2010). Kol (2010) observou um aumento equivalente a 4,2% na resistência à compressão de paralela às fibras de amostras de *Pinus nigra* termomodificadas a 212°C. Silva et al. (2013) encontraram um aumento de 45% na resistência à compressão de amostras termomodificadas a 180°C por três horas. O aumento em tal propriedade pode ser relacionado à redução do teor de umidade de equilíbrio do material termomodificado, pois à medida que a umidade é removida ocorre uma aproximação das unidades estruturais aumentando a área resistente (STAMM, 1964; FIGUEROA et al., 2015). Assim, a redução significativa do teor de umidade de equilíbrio das madeiras termomodificadas, com ênfase para a temperatura de 200°C, pode ter contribuído para o aumento da resistência à compressão paralela às fibras.

Entretanto, há trabalhos onde não ocorreu um aumento da resistência à compressão paralela às fibras. Ates et al. (2009) observaram uma redução, acima de 15%, na resistência à compressão paralela em amostras de *Pinus brutia* termomodificadas a 180°C por duas horas. A redução da propriedade mecânica ocorre devido à degradação térmica de componentes da madeira, como as hemiceluloses (ATES et al., 2009; FIGUEROA et al., 2015).

Ates et al. (2009) complementam que a densidade também teria grande influência na resistência mecânica do material, a qual em seus experimentos apresentou reduções próximas a 4%. A relação entre a densidade da madeira e sua resistência à compressão paralela às fibras foi verificada, no presente estudo, a partir do coeficiente de correlação de Pearson, igual a 0,85 (Tabela 11). Considerando que a densidade do presente

estudo não foi significativamente alterada, tal comportamento pode ter contribuído para conservação da resistência à compressão paralela às fibras.

O aumento ou conservação da resistência à compressão das madeiras termomodificadas deve ser considerado com ressalvas, tendo em vista que tal comportamento não é constante para todas as condições de tratamento, devendo, em todos os casos, ser feito um estudo prévio das alterações em tal propriedade para cada espécie de madeira e condições impostas durante o processo térmico.

4.2.2 Resistência à flexão estática

A Tabela 13 apresenta os valores de resistência à flexão estática (MOR) e módulo de elasticidade na flexão (MOE) da testemunha e madeiras termomodificadas. Conforme indicado anteriormente na Tabela 10, o processo de modificação térmica não teve efeitos significativos sobre os valores médios de MOR e MOE, consequentemente o teste Tukey não identificou diferenças estatísticas entre os valores médios dos diferentes tratamentos.

TABELA 13 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA

Tratamento	Resistência à flexão estática (MPa)	Coefficiente de variação (%)	Módulo de elasticidade estático na flexão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Testemunha	81,6	22,9	8917	20,9
160°C	76,3	18,9	9888	21,8
180°C	82,2	27,5	10388	23,5
200°C	64,5	38,4	9808	26,8

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferenças significativas a 5% de probabilidade.

FONTE: O autor (2019)

Embora o material tratado a 200°C tenha apresentado um valor médio de resistência à flexão estática 21% inferior às amostras testemunha. A elevada variabilidade observada a partir dos coeficientes de variação (Tabela 13) pode ter contribuído para a não diferenciação estatística entre tratamentos empregados.

A ANOVA identificou diferenças estatísticas entre os valores médios de MOR entre blocos (Tabela 10), e como os blocos são provenientes de uma

mesma tábua, a densidade entre os mesmos é mais homogênea resultando em uma menor variabilidade. Entretanto, se analisarmos cada bloco separadamente, em quatro deles o comportamento antes citado prevalece, não havendo diferença nos valores médios de MOR entre os diferentes tratamentos (Tabela 14).

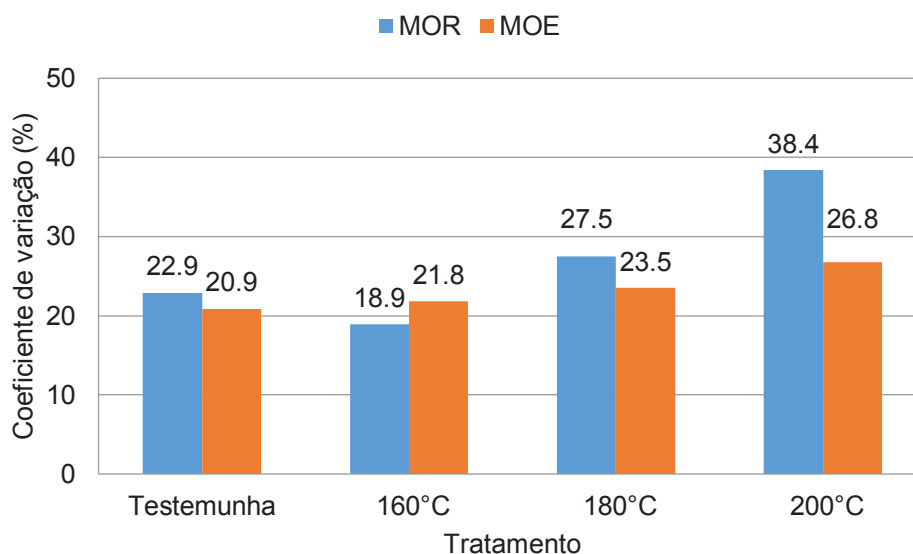
TABELA 14 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DO VAORES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA PARA CADA BLOCO

Fator de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio					
		Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4	Bloco 5	Bloco 6
Tratamento	3	618,8**	735,5 ^{ns}	979,3*	162,5 ^{ns}	620,4 ^{ns}	142,8 ^{ns}
R ²		0,81	0,45	0,82	0,29	0,50	0,10
CV%		9,6	17,8	12,0	18,7	29,9	35,3
**		Diferenças significativas a 1% pelo teste F.					
*		Diferenças significativas a 5% pelo teste F.					
ns		Diferenças não significativas.					

Conforme a Tabela 14, somente dentro dos blocos 1 e 3 os tratamentos foram significativos e a temperatura a 200°C ocasionou uma redução na propriedade. Este resultado indica que 200°C pode estar situada na faixa de temperaturas que começam a alterar negativamente tal propriedade mecânica, apresentando um comportamento ainda não totalmente definido.

Além da diferença de densidades que podem contribuir para o aumento da variabilidade, observando a Figura 23, é possível identificar uma tendência de aumento do coeficiente de variação em função da elevação da temperatura de tratamento para os valores de MOR e MOE.

FIGURA 23 - AUMENTO DOS COEFICIENTES DE VARIAÇÃO



FONTE: O autor (2019)

Tal fato evidencia uma maior variabilidade das propriedades mecânicas das madeiras termomodificadas, que justifica a necessidade do desenvolvimento e domínio de técnicas eficazes para avaliar esse tipo de material, como por exemplo, os ensaios não destrutivos.

O comportamento observado para o MOR contraria o que foi constatado em outros trabalhos, onde foram observadas reduções de tal propriedade após a aplicação de tratamentos térmicos. Modes (2010) observou uma redução de 7,5% nos valores médios de MOR no ensaio de flexão estática, para amostras de *Pinus taeda*, termomodificadas por 3 horas a 160°C. Korkut et al.(2008) observaram reduções de 11,09% e 14,85% nos valores médios de MOR, para amostras de *Pinus Sylvestris* termomodificadas a 150 e 180°C, respectivamente, por um período de exposição, a tal temperatura, de 2 horas.

Silva (2012), trabalhando com amostras de *Pinus taeda* termomodificadas por 2 horas a 160, 180 e 200°C, encontrou um decréscimo próximo a 27 % para as três temperaturas, não constatando diferenças entre os tratamentos. Esteves et al. (2008) por outro lado, observaram decréscimos no MOR na flexão, variando de 4% a 38%, para amostras de *Pinus pinaster* termomodificadas por 2 horas, em temperaturas variando de 180 a 200°C. Kol

(2010) observou uma redução no MOR equivalente a 59,5% para amostras de *Pinus nigra*, aplicando um tratamento térmico a 212°C,

A redução na resistência à flexão, que ocorre nas madeiras termomodificadas, pode ser atribuída principalmente à degradação das hemiceluloses (ESTEVES et al., 2008; KOL et al., 2017). Conforme observado por Ates et al. (2009), nos tratamentos térmicos onde são empregadas temperaturas relativamente baixas (próximas ou abaixo de 200°C) ocorre uma redução significativa no teor de holocelulose (celulose + hemicelulose). Entretanto, o nível de cristalinidade das celuloses não é afetado, concluindo-se que é a parcela amorfa, constituída em grande parte por hemiceluloses, que se degrada.

Assim, embora todas as temperaturas não tenham diferenciado estatisticamente das amostras testemunha, os valores de MOR para tratamentos testemunha, 160 e 180°C apresentaram valores numericamente bastante próximos. Tal fato indica a possibilidade do uso de madeiras menos higroscópicas, conforme indicado pela redução nos teores de umidade de equilíbrio a partir das temperaturas de 160 e 180°C, sem perda significativa da resistência à flexão.

Em relação ao MOE, determinado a partir dos ensaios de flexão estática, seu comportamento frente a tratamentos térmicos é bastante irregular, de forma que se encontram trabalhos onde a variação de tal propriedade é pequena, e em outros onde os decréscimos são significativos. Nos ensaios de Modes (2010), o decréscimo do MOE foi de apenas 2,2% para uma temperatura de tratamento de 160°C. Esteves et al. (2008) encontraram variações de 2% nos valores médios de MOE para temperaturas de tratamento de 180°C, entretanto não houve variações para o tratamento a 200°C. Por outro lado, Korkut et al. (2008) observaram reduções de 18,89% e 29,35% nos valores médios do MOE, para tratamentos a 150 e 180°C, respectivamente.

Embora os resultados, referentes ao MOR, destoem de outros trabalhos e o comportamento do MOE apresente variações após os processos térmicos, é unânime a grande influência das condições de tratamento sobre tais propriedades. De acordo com vários autores, as alterações nas propriedades mecânicas, em decorrência do tratamento térmico, são

influenciadas pelas condições impostas durante o processo, tal como: temperatura, tempo, atmosfera circundante, e também, pelas características do material submetido ao tratamento: características anatômicas da espécie, teor de umidade e dimensões (PINCELLI et al., 2002; HILL, 2006; KORKUT, 2008; MBURU et al., 2008).

Assim, o conjunto de opções definidas antes da modificação térmica, somado às características da espécie a ser tratada, atrelada à heterogeneidade presente dentro de cada espécie, tornam cada processo térmico único, contribuindo para os diferentes resultados. E, portanto, para termomodificar madeiras para um determinado fim, seja estrutural ou não, o processo deverá sempre ser calibrado para as condições do material e equipamentos empregados, a fim de alcançar e otimizar vantagens do mesmo.

4.2.3 Resistência ao cisalhamento na linha de cola

A Tabela 15 apresenta os valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola das juntas coladas do material testemunha e termomodificado e também o percentual de falha na madeira.

TABELA 15 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS - ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA

Tratamento	Resistência ao cisalhamento na linha de cola (MPa)	Coefficiente de variação (%)	Falha na madeira (%)
Testemunha	11,7 a	20,5	75
160°C	11,6 a	13,4	76
180°C	11,7 a	26,7	83
200°C	6,4b	39,1	69

Letras minúsculas diferentes na coluna indicam diferenças significativas a 5% de probabilidade.

FONTE: O autor (2019)

Os tratamentos térmicos a 160 e 180°C não acarretaram em diferenças significativas na resistência ao cisalhamento na linha de cola das madeiras termomodificada sem relação ao material testemunha. Entretanto, o emprego de 200°C no processo térmico ocasionou um decréscimo de 45,3% em relação aos valores observados para a amostra testemunha (Tabela 15).

De acordo com os limites impostos pela ASTM D – 2559-12a (2018) de 10,4 MPa e 8,6 MPa para 8% e 12% de umidade, respectivamente, e os

valores de teor de umidade da madeira apresentados na Tabela 6, somente a modificação térmica a 200°C se mostrou prejudicial à resistência ao cisalhamento na linha de cola, considerando que com uma umidade equivalente inferior a 8% (7,2%) a resistência requerida é superior a 10,4 MPa (Tabela 15). Cabe ressaltar que os valores limite da ASTM D – 2559-12a (2018) foram adotados para a avaliação de madeiras termomodificadas considerando a pequena variação observada, por Silva (2012), na resistência ao cisalhamento de amostras de *Pinus taeda* termomodificadas em condições semelhantes ao presente trabalho.

Os resultados foram semelhantes aos observados por Pincelli et al.(2002) que não observaram reduções na resistência ao cisalhamento na linha de cola de amostras de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* termomodificadas nas temperaturas de 160 e 180°C, testando três tipos de adesivo (fenol-resorcinol-formaldeído, uréia-formaldeído e acetato polivinílico).

Carvalho et al.(2015) também não observaram reduções na resistência ao cisalhamento de amostras de *Pinus sp.* termomodificadas a 180 e 200°C. Somente a partir de 220°C, os valores médios obtidos na resistência das juntas coladas foram inferiores às amostras testemunha. De acordo com os mesmos autores, o tratamento térmico acarreta uma decomposição dos componentes higroscópicos da madeira, os quais também são responsáveis pela ligação química com adesivos. Por consequência, existe certa dificuldade no ancoramento dos adesivos, alterando negativamente a resistência ao cisalhamento na linha de cola em madeiras termomodificadas.

A inativação da superfície das madeiras termo tratadas é outro fator que pode ter contribuído para a redução na resistência ao cisalhamento na linha de cola das amostras tratadas a 200°C. Apesar de ter sido executado um aplainamento prévio, antes da colagem, com o intuito de desobstruir os microporos e também eliminar os possíveis extrativos que migraram para a superfície (SANTOS et al., 2009), tal procedimento provavelmente não foi efetivo para a temperatura mais elevada, como também foi observado no ensaio de molhabilidade.

O tratamento térmico a 200°C também acarretou em um percentual de falhas na madeira inferior ao limite de 75%, requerido pela ASTM D – 2559-12a

(2018), sendo um indício de falha na ancoragem da cola na madeira (Tabela 15). O percentual de falhas na madeira, para os tratamentos testemunha e 160°C, ficaram bem próximos ao limite estipulado por norma. Gonçalves et al.(2016) trabalhando com o mesmo tipo de adesivo (emulsão polimérica de isocianatos – EPI), observaram valores de resistência ao cisalhamento também no limite da norma ASTM D – 5751 (2005), que é menos rígida por ser para elementos não estruturais. Os mesmos autores citaram que o comportamento do EPI pode estar associado a fatores relacionados ao pH do adesivo, mais alcalino, e também à inexistência de pontes de hidrogênio disponíveis.

As alterações ocorridas na molhabilidade, das madeiras termomodificadas podem ter consequências significativas na colagem das mesmas, uma vez que, segundo Hakkou et al. (2005), prejudicam a adesão de tintas e de revestimentos. Conforme visto anteriormente, as madeiras tratadas a 200°C apresentaram as maiores alterações em relação à molhabilidade, que possivelmente acarretou, para as madeiras termomodificadas com a mesma temperatura, falhas na ancoragem dos adesivos e por consequência um comportamento inferior em relação à resistência ao cisalhamento na linha de cola.

Os tratamentos a 160 e 180°C não se diferenciaram em relação às amostras testemunha, e atendem as exigências da ASTM D – 2559-12a (2018) quanto à resistência ao cisalhamento e também quanto ao percentual de falhas na madeira. Tal fato indica a possibilidade de modificação térmica de madeiras, com temperaturas mais brandas, que na sequência necessitem passar por processos de colagem. Entretanto, considerando a proximidade do percentual de falhas na madeira observado com o limite imposto pela norma, é interessante testar o adesivo EPI em outras condições além da seca.

Cabe ressaltar também que foi testado somente um tipo de adesivo e que o mercado dispõe de outros com composições químicas distintas ao EPI, e, que por sua vez, podem apresentar comportamentos também distintos, melhores ou piores.

4.2.4 Ensaios não destrutivos

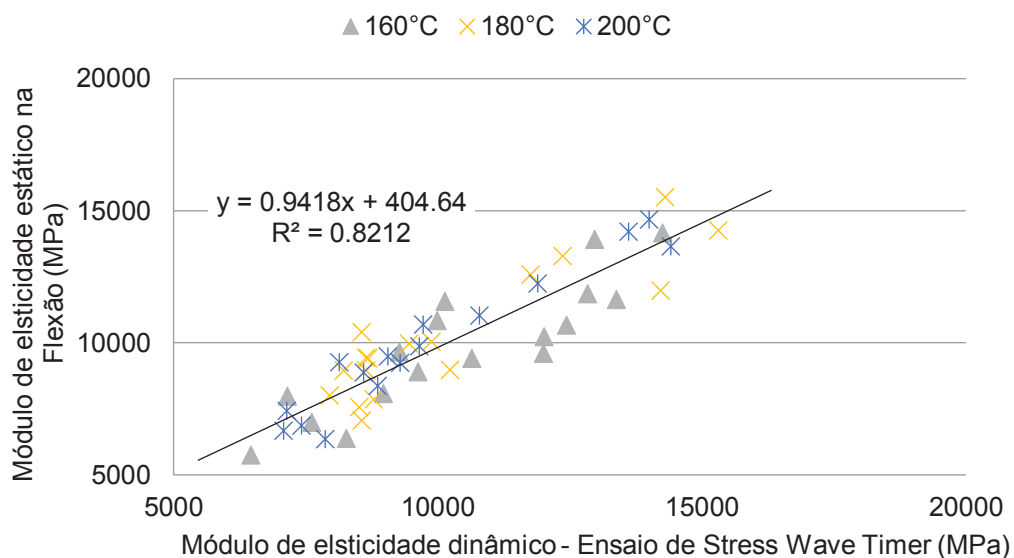
A avaliação das metodologias não destrutivas como ferramentas para estimar propriedades mecânicas das madeiras termomodificadas foi realizada

por meio de regressões lineares. Assim, os resultados dos ensaios não-destrutivos foram plotados em gráficos de dispersão, buscando uma correlação com o módulo de elasticidade estático (MOE) do mesmo material, determinado a partir do ensaio destrutivo de flexão estática.

A partir dos gráficos de dispersão apresentados nas Figuras 24 e 25 observa-se que o MOEd, determinado por ondas de tensão se mostrou um pouco superior ao ensaio com o ultrassom. Entretanto, ambos os ensaios apresentaram correlações fortes com o MOE, expressas pelos índices de determinação (R^2) iguais a 0,82 e 0,75, respectivamente. Apesar disso, tais valores são inferiores aos determinados a partir das amostras testemunha, conforme as Figuras 26 e 27, iguais a 0,84 e 0,85, relativos aos ensaios de ondas de tensão e ultrassom, respectivamente.

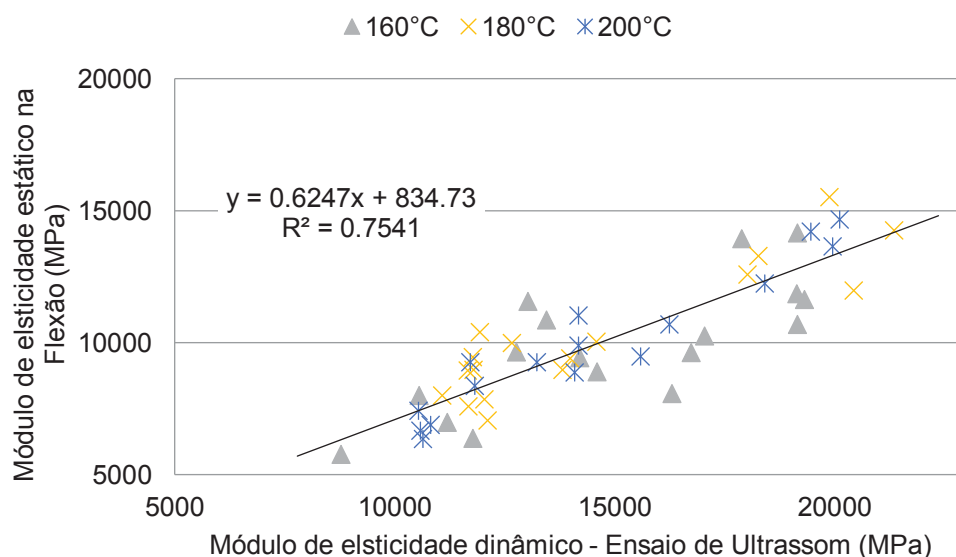
Também trabalhando com madeiras termomodificadas de *Pinus taeda*, Missio et al.(2013) não observaram diferenças significativas nos valores de módulo de elasticidade dinâmico (MOEd), determinado a partir de ondas ultrassônicas, entre as madeiras tratadas a 160°C e as amostras testemunha. Entretanto, os índices de determinação encontrados pelos autores para as madeiras testemunha e termomodificadas a 160°C (0,66 e 0,48), foram inferiores ao presente trabalho.

FIGURA 24 - CORRELAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO DETERMINADOS ATRAVÉS DO ENSAIO DE ONDAS DE TENSÃO (*STRESS WAVE TIMER*) EM AMOSTRAS DE *PINUS TAEDATERMOMODIFICADAS*



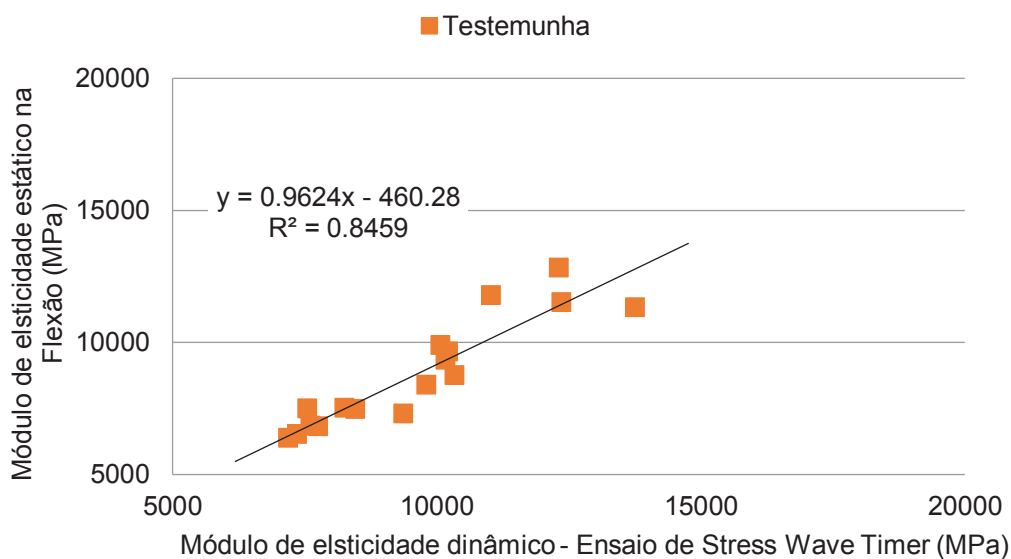
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 25- CORRELAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO DETERMINADOS ATRAVÉS DO ENSAIO DE ULTRASSOM EM AMOSTRAS DE *PINUS TAEDATERMOMODIFICADAS*



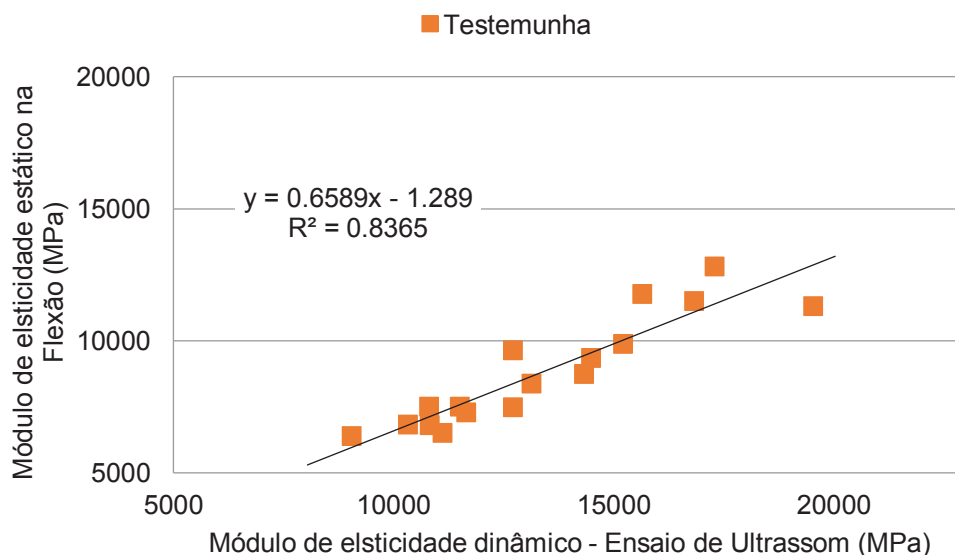
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 26 - CORRELAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO DETERMINADO ATRAVÉS DO ENSAIO DE ONDAS DE TENSÃO (STRESS WAVE TIMER), DETERMINADOS EM AMOSTRAS DE MADEIRA TESTEMUNHA DE *PINUS TAEDA*.



FONTE: O autor (2019)

FIGURA 27 - CORRELAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO DETERMINADO ATRAVÉS DO ENSAIO DE ULTRASSOM DETERMINADOS EM AMOSTRAS DE MADEIRA TESTEMUNHA DE *PINUS TAEDA*.



FONTE: O autor (2019)

Tratamentos térmicos severos podem acarretar em variações do MOEd devido à alterações na estrutura anatômica das madeiras (MISSIO et al., 2013),

o que pode explicar a redução nos índices de determinação das madeiras termomodificadas em relação à testemunha. Entretanto, com a faixa de temperaturas aplicadas nos tratamentos, a aplicação dos ensaios não destrutivos se mostrou adequada, resultando em índices de determinação satisfatórios.

Assim, a partir de qualquer uma das duas metodologias (ultrassom ou ondas de tensão), e respectivas equações do gráfico, é possível estimar o MOE da madeira, com precisão adequada, próxima a 80% de probabilidade de acerto, após processos de tratamento térmico para temperaturas próximas a 160°C, 180°C e 200°C. Este resultado indica que ambas as técnicas não-destrutivas podem ser aplicadas em madeiras termomodificadas para estimar suas propriedades mecânicas, com uma precisão adequada.

5 CONCLUSÕES

O processo de modificação térmica da madeira de *Pinus taeda* L., em relação às propriedades físicas, ocasionou uma redução no teor de umidade de equilíbrio do material, aumentou a estabilidade dimensional das madeiras termomodificadas a 200°C e também alterou a molhabilidade das madeiras, tanto na face tangencial como radial. Entretanto, o processo não alterou a densidade aparente a 0% de umidade.

Em relação às propriedades mecânicas, a modificação térmica resultou em um aumento da resistência à compressão paralela às fibras da madeira e não alterou os módulos de ruptura (MOR) e de elasticidade (MOE) determinados por meio do ensaio de flexão estática. O processo térmico também não alterou a adesividade das madeiras termomodificadas a 160 e 180°C, acarretando em uma redução da resistência ao cisalhamento na linha de cola somente para a temperatura de 200°C. Além disso, as técnicas não destrutivas de ultrassom e ondas de tensão se mostraram adequadas para estimar propriedades mecânicas das lamelas termomodificadas.

Considerando as alterações positivas em propriedades físicas e a ausência de alterações prejudiciais em propriedades mecânicas e de adesividade, a madeira de *Pinus taeda* L. termomodificada a 160°C e 180°C, pode ser empregada na função de lamelas para a produção de madeira laminada colada (MLC).

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para uma melhor compreensão do comportamento e aptidão do material utilizado no presente estudo para a produção de lamelas de madeira, visando elementos de madeira laminada colada, sugere-se:

- Análise dos constituintes químicos das madeiras testemunha e termomodificadas para comprovar possíveis alterações na composição química durante o processo térmico;
- Aplicação de outros adesivos, considerando a enorme gama de tipos e marcas presentes no mercado atual, que podem acarretar em comportamentos distintos;
- Além do ensaio a seco, submeter às juntas coladas a ciclos de secagem e umedecimento antes dos ensaios de cisalhamento na linha de cola, com o intuito de simular outras condições ambientais.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 143**: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. 2014.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 905**: Strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. 2008.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 2559 12a**: Adhesives for bonded structural wood products for use under exterior exposure conditions. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- ATES, A.; AKYILDIZ, M. H.; OZDEMIR, H. Effects of heat treatment on calabrian pine (*Pinus brutia ten.*) wood. **BioResources**. V. 4, n. 3, p. 1032-1043, 2009.
- AYDIN, I.; COLAKOGLU, G. Effects of surface inactivation, high temperature drying and preservative treatment on surface roughness and colour of alder and beech wood. **Applied surface science**. V. 252, p. 430-440, 2005.
- AZAMBUJA, M. DOS A.; CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A.; FIORELLI, J.; CARRASCO, E. V. M.; DUARTE, R. S.; DIAS, G. L.; SZUCS, C. A.; VALLE, A. Proposta de normalização para Madeira Laminada Colada (MLC). **Madeira: arquitetura e engenharia**. N. 13, 2004.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. Variabilidade da madeira de *Pinus caribaea var hondurensis*. **IPEF**. N. 18, p. 81-102, 1979.
- BELLON, K. R. DA R. **Modificação térmica da madeira de três espécies de florestas plantadas pelo processo VAP holzsysteme®**. Dissertação (Mestrado em Engenharia florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- BATISTA, D. C.; TOMASELLI, I.; KLITZKE, R. J. Efeito do tempo e da temperatura de modificação térmica na redução do inchamento máximo da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**. V.21, n.3, p. 533-540, 2011.

BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira de *Eucalyptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro VAP HolzSysteme**. Tese (Doutorado em Engenharia florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 1982.

BOONSTRA, M. J.; TJEERDMA, B. Chemical analysis of heat treated softwoods. **European Journal of Wood and Wood Products**. V. 64, p. 204-211, 2006.

BORGES, L. M.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Biomassa e energia**. V. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel; 1991.

CADEMARTORI, P. H. G. DE. **Propriedades tecnológicas da madeira termorretrificada de três espécies de *Eucalyptus***. Dissertação (Mestrado em Engenharia de materiais) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

CADEMARTORI, P. H. G. DE; MISSIO, A. L.; MATTOS, B. D.; GATTO, D. A. Effect of thermal treatments on technological properties of wood from two *Eucalyptus* species. **Anais da academia brasileira de ciências**. V. 87, n. 1, p. 471-481, 2015.

CALONEGO, F. W. **Efeito da termorretrificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

CALIL NETO, C. C. Madeira laminada colada (MLC): **Controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CALIL NETO, C.; CHRISTOFORO, A. L.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; LAHR, F. A. R.; CALIL JUNIOR, C. Avaliação da resistência ao cisalhamento e à

delaminação em madeira laminada colada. **Ciência Florestal**. V. 24, n. 4, p. 987-994, 2014.

CALIL NETO, C.; FUJII, R.; TAKATA, A. Madeira laminada colada no Brasil: Situação atual e perspectivas. **XV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, Curitiba, 2016.

CARRASCO, E. V. M.; OLIVEIRA, A. L. C.; MANTILLA, J. N. R. Influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade em madeira de híbridos de eucaliptos. **Ciência florestal**. V.26, n.2, p.389-400, 2016.

CARVALHO, A. G.; DONATO, D. B.; ZANUNCIO, A. J. V.; CARNEIRO, A. de C. P.; VITAL, B. R.; FREITAS, F. P. de. Colagem de madeira de *Pinus* termorretrificada. **Ciência da madeira**. V. 6, n. 3, p. 217-222, 2015.

CHRISTIANSEN, A.W. How overdrying wood reduces its bonding to phenol-formaldehyde adhesives: a critical review of the literature. Part I. physical responses. **Wood and Fiber Science**. V. 22, p.441-459, 1990.

CLAUSEN, C. A. Biodegradation of wood In: Forest Products Laboratory **Wood handbook - Wood as an engineering material**. United States Department of Agriculture Forest Service, Wisconsin, Madison, 2010.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS (COPANT). **COPANT 460**: Métodos de determinación de la humedad. Buenos Aires, 1972.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS (COPANT). **COPANT 461**: Métodos de determinación del peso específico aparente. Buenos Aires, 1972.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS (COPANT). **COPANT 555**: Método de ensayo de flexión estática. Buenos Aires, 1973.

CORREAL, J. F.; ECHEVERRY, J. S.; RAMÍREZ, F.; YAMÍN, L. E. Experimental evaluation of physical and mechanical properties of Glued Laminated *Guadua angustifolia* Kunth. **Construction and Building Materials**. V. 73, p. 105–112, 2014.

CUNHA, A. B. DA. **Produção de vigas estruturais de madeira avaliadas por meio de ensaios estáticos e dinâmicos**. Tese (Doutorado em Engenharia

florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

CUNHA, A. B. DA; MATOS, J. L. M. DE. Rigidez e resistência de vigas estruturais de madeira laminada colada e com perfil I compostas por diferentes adesivos. **Ciência Florestal**. V. 20, n. 2, p. 345–356, 2010a.

CUNHA, A. B. DA; MATOS, J. L. M. DE. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo ("stress wave timer"). **Revista Árvore**, V. 34, n. 2, p. 345–354, 2010b.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. DE. Avaliação da rigidez de vigas estruturais de madeira laminada colada unidas por adesivo poliuretano. **Cerne**. V. 17, n. 4, p. 593-600, 2011.

DIETSCH, P.; TANNERT, T. Assessing the integrity of glued-laminated timber elements. **Construction and Building Materials**. V. 101, p. 1259–1270, 2015.

DINWOODIE, J. M. Properties and performance of wood adhesives. In: Marcel Dekker, Inc: **Wood adhesives: chemistry and technology**. Nova Iorque, 1983.

DUARTE, J. B. **Princípios sobre delineamentos em experimentação agrícola**. Especialização (Especialização em estatística) – Instituto de matemática e física, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1996.

ESTEVES, B.; MARQUES, A. V.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. **Wood science and technology**. V.41, p. 193-207, 2007.

ESTEVES, B. M.; DOMINGOS, I. J.; PEREIRA, H. M. Pine wood modification by heat treatment in air. **Bioresources**. V. 3, n. 1, p.142-154, 2008.

FALK, R. H. Wood as a sustainable building material. In: Forest Products Laboratory **Wood handbook - Wood as an engineering material**. United States Department of Agriculture Forest Service, Wisconsin, Madison, 2010.

FARIA, O. B. DE et al. Influência da umidade no módulo de elasticidade longitudinal da madeira. **Madeira arquitetura e Engenharia**. V. 9, n. 22, p. 57-69, 2008.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions**. Nova Iorque: Walter de Gruyter, 1989.

FINK, G.; KOHLER, J. Quantification of different NDT/SDT methods in respect to estimate the load-bearing capacity. **Construction and Building Materials**. V. 101, p. 1181-1187, 2015.

FIELD, A. **Discovering Statistics Using SPSS**. (4. ed.), London: Sage, 2013.

FRIHART, C. R.; HUNT, A. G. Adhesives with wood materials: Bond formation and performance. In: Forest Products Laboratory Wood handbook - **Wood as an engineering material**. United States Department of Agriculture Forest Service, Wisconsin, Madison, 2010.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO – FAPESP. Elias Taylor Durgante Severo e Fred Williams Calonego. **Processo de modificação térmica por irradiação de calor, para a melhora da estabilidade dimensional e da durabilidade biológica de madeira sólida** - PI 0902138-8 A2. 24 Jun. 2009 01 Mar. 2011.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. In: Forest Products Laboratory **Wood handbook - Wood as an engineering material**. United States Department of Agriculture Forest Service, Wisconsin, Madison, 2010.

GOLSTEIN, I. S. Overview of the chemical composition of wood. In: **Wood structure and composition**. Nova Iorque: Marcel Dekker, Inc, 1991.

GONÇALVES, F. G.; SEGUNDINHO, P, G, de A.; SHAYDER, L. F.; TINTI, V. P.; SANTIAGO, S. B. Avaliação da resistência ao cisalhamento da madeira de *Pinus sp.* coladas em temperatura ambiente. **Ciência da madeira**. V. 7, n. 1, p. 42-50, 2016.

HAKKOU, M.; PETRISSANS, M.; ZOULALIAN, A.; GÉRARDIN, P. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. **Polymer Degradation and Stability**. V. 89, p. 1-5, 2005.

HIGUCHI, T. **Biochemistry and molecular biology of wood**. Berlim:Springer, 1997.

HILL, C. A. S. **Wood modification: Chemical, thermal and other processes**. John Wiley Sons Ltd, Chichester, West Sussex, 2006.

Indústria brasileira de árvores - IBÁ. Relatório 2017. relatório técnico. São Paulo, 2017

Instituto de pesquisas tecnológicas - IPT. **Madeira: Uso Sustentável na construção civil**. São Paulo, 2009

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba, 2005

JERMER, J.; BENGTSSON, C.; BREM, F.; CLANG, A.; EK-OLAUSSEN, B.; EDLUND, M. L. Heat-treated wood - durability and technical properties. **SP Building Technology and Mechanics** SP Report 2003:25. SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, 2003.

JIANG, Y.; SCHAFFRATH, L.; KNORZ, M.; WINTER, S. Bonding of various wood species – Studies about their applicability in Glued Laminated Timber. In: **Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology - RILEM Book series**. V.9, 2014.

KARTAL, S. N.; HWANG, W.; IMAMURA, Y. Water absorption of boron-treated and heat-modified wood. **Journal of wood science**.V.53, p. 454-457, 2007.

KEEY, R. B.; LANGRISH, T. A. G.; WALKER, J. C. F. Kiln-drying of lumber. Nova Iorque: Springer, 1999.

KOL, H. S.; Characteristics of heat-treated Turkish pine and fir wood after ThermoWood processing. **Journal of environmental biology**. V. 31, n. 6, p. 1007-1011, 2010.

KOL, H. S.; AYSAL, S.; GÜNDÜZ, K. Effects of heat treatment on the mechanical properties and dimensional stability of beech wood. **Journal of advanced technology sciences**.p. 820-830, 2017.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. Principles of wood science and technology: Wood based materials. Volume 2.Nova Iorque: Springer, 1975.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. Principles of wood science and technology: Solid wood. Volume 1.Nova Iorque: Springer, 1968.

KORKUT, S.; AKGÜL, M.; DÜNDAR, T. The effects of heat treatment on some technological properties of Scot pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. **Bioresource Technology**. V. 99, p. 1861-1868, 2008.

KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood. In: Forest Products Laboratory **Wood handbook - Wood as an engineering material**. United States Department of Agriculture Forest Service, Wisconsin, Madison, 2010.

LAROCA, C. **Habitação Social Em Madeira: Uma Alternativa Viável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

LEBOW, S. T. Wood preservation. In: Forest Products Laboratory **Wood handbook - Wood as an engineering material**. United States Department of Agriculture Forest Service, Wisconsin, Madison, 2010.

LEITE, T. M.; SANTOS, P. A. F. M.; VALLE, I. M. R. do. O uso da madeira laminada no Brasil: Panorama e desafios. In: CLEAM+CLIMAD, 2017, Buenos Aires, Argentina.

LOPES, M. DE C. **Espectroscopia no infravermelho próximo aplicada na avaliação de painéis de madeira colados lateralmente**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MAGALHÃES, L. N. DE SANTOS, R. D. L. DOS. Madeira laminada colada como material de uma construção sustentável. **Construindo**. V. 1, n. 2, p. 25–27, 2009.

MATOS, J. L. M. DE. **Produção de vigas de madeira laminada colada**. Curitiba, 2002.

MATSUNAGA, D. K. **Avaliação da utilização de madeira comercial de *Pinus taeda* e da adequabilidade da norma européia (CEN), à construção de vigas laminadas coladas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

MBURU, F.; DUMARÇAY, S.; BOCQUET, J. F.; PETRISSANS, M.; GÉRARDIN, P. Effect of chemical modifications caused by heat treatment on

mechanical properties of *Grevillea robusta* wood. **Polymer Degradation and Stability**. V. 93, p. 401-405, 2008.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. **Revista Tecnológica**, n. Edição Especial ENTECA, p. 35–45, 2009.

MISSIO, A. L.; GATTO, D. A.; MODES, K. S.; SANTINI, E. J.; STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L. Método ultrassônico para a estimativa do módulo de elasticidade de madeiras de *Pinus taeda* tratadas termicamente. **Ciência rural**. V. 43, n. 4, p. 616-622, 2013.

MODES, K. S.; SANTINI, E. J.; VIVIAN, M. A.; GARLET, A. Influência da termorreificação na resistência a degradação biológica das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**. V. 27, n. 3, p. 993-1002, 2017.

NASCIMENTO, A. M. DE; GARCIA, R. A.; LUCIA, R. M. D. Qualidade de adesão de juntas coladas de diferentes espécies comerciais de madeira. **Cerne**. V. 19, n. 4, p. 593-601, 2013.

NIELSEN, I. R. **Utilização da madeira comercial do híbrido de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake x *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na confecção de vigas laminadas coladas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; BRITO, J. O.; CORRENTE, J. C. Avaliação da termorreificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia forestalis**. n. 61, p. 122-132, 2002.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Effect of thermal rectification on colors of *Eucalyptus saligna* and *Pinus caribaea* woods. **Maderas.Ciencia y tecnologia**. V. 14, n. 2, p. 239-249, 2012.

PIZZI, A. **Wood adhesives: chemistry and technology**. Nova Iorque: Marcel Dekker, Inc, 1983.

PRATA, J.G. **Estudo da viabilidade tecnológica do uso de espécies de pinus tropicais para produção de painéis colados lateralmente (edge glued panels – EGP)**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PUBEL, D. S.; GARCIA, R. A.; SANTOS, W. A.; OLIVEIRA, G. L.; ABREU, H. S. Efeito da termorretificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea*. **Cerne**. V. 19, n. 3, p. 391-398, 2013.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. T. **Projeto de experimentos**. Série monográfica qualidade. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

SANTOS, A. M. L.; SOUZA, F.; COSTA, M. A.; TELES, R. F.; PAZETTO, V. M. F.; MENEZZI, C. H. S. Efeito do tratamento térmico sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola em painéis OSB. **Ciência Florestal**. V. 19, n. 1, p. 31-40, 2009.

SEGUNDINHO, P. G. DE A. et al. Avaliação de madeira laminada colada de cedrinho (*Erismia uncinatum* Warm). **Cerne**. v. 19, n. 3, p. 441–449, 2013.

SEGUNDINHO, P. G. DE A. et al Evaluation of brazilian reforestation species in glulam beams before and after preservative chemical treatments. **International Journal of Materials Engineering**. V. 4, n. 6, p. 192-195, 2014.

SHIMIZU, J. Y. **Pínus na silvicultura brasileira**. Embrapa, p. 223, 2008.

SILVA, M. R. da; MACHADO, G. de O.; CHRISTÓFORO, A. S.; BRITO, J. O.; GOVONE, J. S.; JUNIOR, C. C. Resistência do *Pinus taeda* termorretificado. **Madeira: Arquitetura e engenharia**. V. 14, n. 34, p. 55-62, 2013.

SILVA, M. R. da. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de *Eucalypto citriodora* e *Pinus taeda***. Tese (Doutorado Ciência e Engenharia de materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, D. A. L.; LAHR, F. A. R.; FARIA, O. B. de; CHAHUD, E. Influence of wood moisture content on the modulus of elasticity in compression parallel to the grain. **Materials Research**. V. 15, n. 2, p. 300–304, 2012.

SILVA, J. DE C.; OLIVEIRA, J. T. da S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**. V. 27, n. 2, p. 233-239, 2003.

Sistema nacional de informações florestais (SNIF). **Relatório 2016**. Relatório técnico. V. 1, ed. 1, São Paulo, 2016.

STAMM, A. J. **Wood and cellulose science**. Raleigh: The Ronald press company, 1964.

STANGERLIN, D. M.; CADEMARTORI, P. H. G. DE; GATTO, D. A.; CALEGARI, L.; MELO, R. R. DE; VIVIAN, M. A.; MODES, K. S. Propagação indireta e semidireta de ondas ultrassônicas na estimativa de propriedades mecânicas da madeira. **Ciência da Madeira**. V. 2, n. 2, p. 85-95, 2011.

STARK, N. M.; CAI, Z.; CARLL, C. Wood-Based Composite Materials Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood–Non wood Composite Materials. In: Forest Products Laboratory **Wood handbook - Wood as an engineering material**. United States Department of Agriculture Forest Service, Wisconsin, Madison, 2010.

VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; JANKOWSKY, I. P. Preservação de madeiras no Brasil: Histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**. V. 25, n.1, p. 257-271, 2015.

VITAL, B. R.; ANDRADE, P. I. L.; CARNEIRO, A. C. O.; CABRAL, C. P. T.; CARVALHO, A. M. M. Estabilidade dimensional e resistência à tração perpendicular de painéis fabricados com partículas termorretificadas oriundas de embalagens de *Pinus sp.* **Revista Árvore**. V. 38, n. 5, p. 951-959, 2014.

VIVIAN, M. A.; MODES, K. S.; SANTINI, E. J.; CARVALHO, D. E.; MORAIS, W. W. C.; SOUZA, J. T. DE; GATTO, D. A. Estimativa dos módulos de elasticidade e ruptura da madeira de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell por meio de método não destrutivo. **Ciência da Madeira**. V. 3, n. 2, p. 91-101, 2012.

WIEDENHOEFT, A. C.; MILLER, R. B. Structure and Chemistry In: **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Estados Unidos: CRC Press, 2005.

WIEMANN, M. C. Characteristics and availability of commercially important woods. In: Forest Products Laboratory **Wood handbook - Wood as an engineering material**. United States Department of Agriculture Forest Service, Wisconsin, Madison, 2010.

WILCOX, W. W.; BOTSAL, E. E.; KUBLER, H. **Hood as a building material: A guide for designers and builders**. Estados unidos: John Wiley & Sons, Inc., 1991.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.